

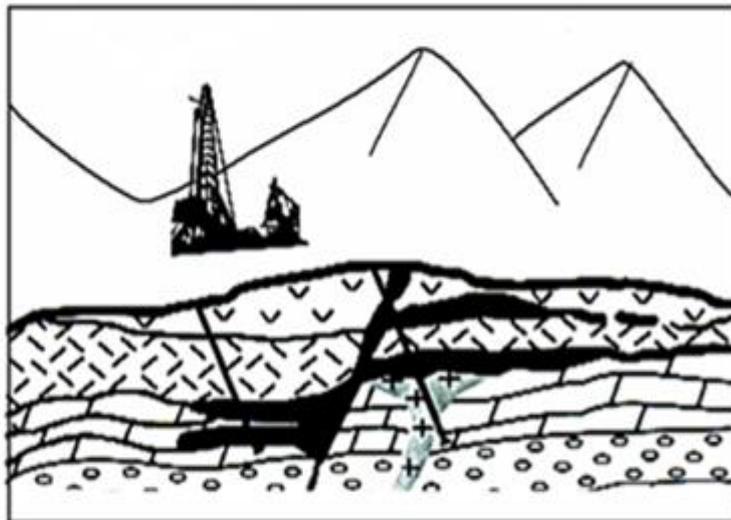
ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463



ИЗВЕСТИЯ

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ



2018

Том 41, № 4

Министерство образования и науки РФ
ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Том 41, № 4

Издательство
Иркутского национального исследовательского
технического университета

2018

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

**IRKUTSK NATIONAL RESEARCH
TECHNICAL UNIVERSITY**

**ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463**

P R O C E E D I N G S
**OF THE SIBERIAN DEPARTMENT OF THE SECTION OF EARTH SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES**

**GEOLOGY, EXPLORATION
AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS**

Vol. 41, No. 4

**Irkutsk National Research
Technical University
Publishers**

2018

УДК 550:553. **Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.** – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. – Т. 41. – № 4. – 131 с.

Журнал «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания Российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН, имеет государственную регистрацию и распространяется по подписке в каталоге агентства «Почта России», подписной индекс – 38200. С 2013 г. журнал включен в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, а с 2015 г. – в базу данных EBSCO. Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Редакционная коллегия:

Главный редактор – Р.М. Лобацкая, д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой геммологии, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместители главного редактора – Л.И. Аузина, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия), С.Ю. Красноштанов, канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь – В.А. Храмовских, канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Редакционный совет:

Д.П. Гладкочуб, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия), И.В. Гордиенко, член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия), В.А. Душин, д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия), А.В. Козлов, д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (г. Санкт-Петербург, Россия), А.Т. Корольков, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия), В.А. Макаров, д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия), Ю.Б. Миронов, д-р геол.-минерал. наук, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, Россия), Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия), Б.Л. Тальгамер, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия), А.И. Трубачев, д-р геол.-минерал. наук, проф., Забайкальский государственный университет (г. Чита, Россия)

Председатель редакционного совета – Ж.В. Семинский, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал создан в 2004 году на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 года
Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации журнала ПИ № ФС77-67479 от 18.10.2016 г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
Иркутского национального исследовательского технического университета

Адрес редакции, учредителя и издателя: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет», 2018

UDC 550:553. **Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.** – Irkutsk: INRTU Publishers, 2018. – Vol. 41. – No. 4. – 131 p.

The journal “Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits” **is included in the current list of editions of the State Commission for Academic Degrees and Titles for the publication of the main results of dissertations for Candidate’s and Doctoral degrees**, in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is sent to the Russian Book Chamber of All-Russia Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. It has a state registration and is distributed by subscription in the catalog of the “Russian Post” agency, the subscription index is 38200. From 2013, the journal is included in the international catalog of Ulrich’s Periodicals Directory and from 2015 it is included in EBSCO database. The articles published in the journal are abstracted and peer reviewed. The journal accepts articles in the scientific field of “Earth Sciences”.

Editorial Board:

Editor-in-Chief – R.M. Lobatskaya, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Gemology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editors-in-Chief – L.I. Auzina, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), S.Yu. Krasnoshtanov, Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary – V.A. Khramovskikh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Council:

D.P. Gladkochub, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk, Russia), I.V. Gordienko, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute of SB RAS (Ulan-Ude, Russia), V.A. Dushin, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Ural State Mining University (Ekaterinburg, Russia), A.V. Kozlov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, National Mineral Resources University “Mining University” (St. Petersburg, Russia), A.T. Korolkov Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia), V.A. Makarov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia), Yu.B. Mironov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (St. Petersburg, Russia), Ochir Gerel, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Mongolian university of science and technology (Ulan Bator, Mongolia), B.L. Talgamer, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), A.I. Trubachev, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Trans-Baikal State University (Chita, Russia)

Chairman of the Editorial Council – Zh.V. Seminsky, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal was founded in 2004 on the basis of the interacademic Collection of research papers “Geology, prospecting and exploration of ore minerals”, which had been published since 1973
Periodicity – 4 times a year

Founder – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

Journal Registration Certificate PI no. ФС77-67479 of October 18, 2016

Recommended for publication by the Editorial Committee of the Irkutsk National Research Technical University

Editorial Office Address: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”,
83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia.

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”, 2018

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Том 41, № 4 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

**Геология, поиски и разведка
месторождений полезных ископаемых**

Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф. Возраст и изотопная характеристика Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (Республика Бурятия).....	7
Кузеванов К.И., Кузеванов К.К., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Гидрогеологические условия Бакчарского железорудного месторождения и предварительная оценка водопритоков.....	22
Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. Состав растворов, формировавших молибденовое оруденение Первомайского месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье)	37
Кочнев А.П., Краснов Д.А., Иванова Р.Н. Опыт многофакторного локального прогнозирования на примере Голюбинско-Олламинского нефритиносного поля (Республика Бурятия).....	50

**Технологии разведки и разработки
месторождений полезных ископаемых**

Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Решение обратных задач гравиметрии с помощью методов математической статистики.....	67
Кочукова В.А., Пашевин А.М. Эффективность применения комплекса геофизических методов при выделении вулcano-тектонических структур в Зее-Буреинском бассейне.....	79
Чебан А.Ю. Техника для выемки крутопадающих рудных тел и технология данного процесса.....	89
Павлов А.М., Федоляк А.А. Повышение эффективности подземной разработки золоторудных месторождений Восточной Сибири.....	97
Мартынов Н.Н., Заливин В.Г. Технология ликвидации поглощений бурового раствора при бурении в интервалах трапповых интрузий.....	107

Гипотезы, сообщения, дискуссия

Семинский Ж.В. К тектонике и металлогении Шарыжалгайского выступа Сибирской платформы (Восточный Саян).....	118
К сведению авторов	125

PROCEEDINGS
OF THE SIBERIAN DEPARTMENT OF THE SECTION OF EARTH SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES

**GEOLOGY, EXPLORATION AND DEVELOPMENT
OF MINERAL DEPOSITS**

Vol. 41, No. 4 2018

C O N T E N T S

Pp.

**Geology, Prospecting and Exploration
of Mineral Deposits**

Savchenko A.A., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Posokhov V.F. Age and isotopic characteristics of the Buluktai Mo-W deposit (Republic of Buryatia)	7
Kuzevanov K.I., Kuzevanov K.K., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D. Hydrogeological conditions of the Bakchar iron ore deposit and preliminary estimation of water inflows.....	22
Damdinova L.B., Damdinov B.B. Composition of solutions forming molybdenum mineralization of Pervomaiskoe deposit (Dzhida ore field, South-Western Transbaikalia).....	37
Kochnev A.P., Krasnov D.A., Ivanova R.N. Experience of multifactor local forecasting on example of the Golubinsko-Ollaminskoe nephrite field (Republic of Buryatia).....	50

**Technologies of Exploration and Development
of Mineral Deposits**

Kanaikin V.S., Turutanov E.H., Buyantogtokh B. Solving inverse problems of gravimetry by mathematical statistics methods.....	67
Kochukova V.A., Pashevin A.M. Efficiency of a complex of geophysical methods in the allocation of volcano-tectonic structure in the Zeya-Bureya basin.....	79
Cheban A.Yu. Machines for extraction of steeply dipping ore bodies and technology of this process.....	89
Pavlov A.M., Fedolyak A.A. Improving efficiency of gold deposit underground mining in Eastern Siberia.....	97
Martynov N.N., Zalivin V.G. Technology to eliminate absorbing of drilling solution when drilling within the range of trappean intrusions.....	107

Hypotheses, Reports, Discussion

Seminsky Zh.V. To tectonics and metallogeny of Sharyzhalgay uplift of Siberian Platform (East Sayan).....	118
Attention of authors	125

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.462

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21>

ВОЗРАСТ И ИЗОТОПНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БУЛУКТАЕВСКОГО МОЛИБДЕН-ВОЛЬФРАМОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

© А.А. Савченко^а, Г.С. Рипп^б, И.А. Избродин^с, В.Ф. Посохов^д

^{а-д}Геологический институт СО РАН,
670047, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

РЕЗЮМЕ: Цель данной статьи – датирование рудного процесса, изучение состава и характеристика минеральных парагенезисов, присутствующих в породах и рудах Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения, оценка источников вещества и флюидов. Re-Os метод (Центр изотопных исследований ВСЕ-ГЕИ) использовался для установления возраста молибденового оруденения. Изотопные составы кислорода в силикатах, а также углерода в карбонатах определены в Геологическом институте СО РАН. Изотопный состав водорода гидроксильной воды мусковита определен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН. Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН, частично в Тбилисском государственном университете. Re-Os методом установлен возраст молибденового этапа (144 ± 10 млн лет). Изотопные составы сульфидной серы как молибденового, так и вольфрамового этапа в целом ложатся в интервал значений, близкий к значениям мантийного источника. Изотопные составы кислорода в минералах молибденового и вольфрамового этапов четко разделяются на две группы. Образование месторождения происходило при участии мантийного источника. На заключительной стадии отмечено увеличение в составе флюидов роли метеорной воды.

Ключевые слова: молибден-вольфрамовое месторождение, кварц-гюбнерит-шеелитовые жилы, берилл, молибденит, изотопный состав кислорода, серы, водорода и углерода, Re-Os анализ

Благодарность: Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00129_а).

Информация о статье: Дата поступления 11 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф. Возраст и изотопная характеристика Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (Республика Бурятия). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2018;41(4):7–21. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21.

^аСавченко Алена Алексеевна, инженер лаборатории петрологии, аспирант, e-mail: savchenko@ginst.ru
Alena A. Savchenko, Engineer of the Petrology Laboratory, Postgraduate, e-mail: savchenko@ginst.ru

^бРипп Герман Самуилович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии, тел.: 8 (3012) 433955, e-mail: ripp@ginst.ru
German S. Ripp, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433955, e-mail: ripp@ginst.ru

^сИзбродин Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петрологии, тел.: 8 (3012) 433955, e-mail: izbrodin@ginst.ru
Ivan A. Izbrodin, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433955, e-mail: izbrodin@ginst.ru

^дПосохов Виктор Федорович, старший научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433955, e-mail: vitaf1@yandex.ru
Viktor F. Posokhov, Senior Researcher, tel.: 8 (3012) 433955, e-mail: vitaf1@yandex.ru

AGE AND ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF THE BULUKTAI MO-W DEPOSIT (REPUBLIC OF BURYATIA)

© Alena A. Savchenko^a, German S. Ripp^b, Ivan A. Izbrodin^c, Viktor F. Posokhov^d

^{a-d}Geological Institute SB RAS,
6a, Sakhyanova St., Ulan-Ude, 670047, Republic of Buryatia, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the article is to date the ore formation process, study the composition and provide the description of mineral parageneses in rocks and ores of the Buluktai Mo-W deposit as well as to estimate the sources of matter and fluids. The Re-Os method (The Center for isotopic studies of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)) is used for dating the molybdenum mineralization. The isotopic compositions of oxygen in silicates and carbon in carbonates is determined in the Geological Institute SB RAS. The isotopic composition of hydrogen of muscovite hydroxyl water is determined in the Center for isotopic studies of the Far Eastern Branch RAS. The isotopic analysis of sulfide sulfur is carried out in the Center for isotopic studies of the Far Eastern Branch RAS and partly at the Tbilisi State University. The age of the molybdenite phase (144 ± 10 Ma) has been determined using the Re-Os method. The isotopic compositions of sulfide sulfur in both molybdenum and tungsten stages show a range of values close to the values of a mantle source. The isotopic compositions of oxygen in the minerals of Mo and W-stages are clearly divided into two groups. The deposit was formed with the participation of a mantle source. Its final stage is characterized with the increased influence of meteoric water as a part of fluids.

Keywords: Mo-W deposit, quartz-hubnerite-scheelite veins, beryl, molybdenite, isotopic composition of oxygen, sulfur, hydrogen, and carbon, Re-Os analysis

Acknowledgement: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 17-05-00129_a).

Information about the article: Received July 11, 2018; accepted for publication November 28, 2018; available online 28 December 2018.

For citation: Savchenko A.A., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Posokhov V.F. Age and isotopic characteristics of the Buluktai Mo-W deposit (Republic of Buryatia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):7–21 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21.

Введение

Согласно источнику [1], характеристика Минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых России содержит сведения о том, что на территории республики Бурятия сосредоточено 26,89 % общероссийских балансовых запасов молибдена.

Булуқтаевское месторождение находится в пределах Джидинской структурно-металлогенической зоны, входящей в состав Саяно-Байкальского металлогенического пояса [2]. Рудный район расположен в бассейне верхнего течения реки Джиды, протягивается почти на 160 км при ширине 40–70 км, занимая

площадь около 7200 км². В пределах его известно 7 месторождений, около 20 рудопроявлений и более 60 минерализованных точек. Геологии, минералогии, последовательности образования и оценке возраста месторождения посвящено большое количество работ [2–9].

Оруденение представлено кварцевыми жилами, штокверковыми зонами и полимиктовой трубообразной брекчией. По данным геохронологических исследований [8], возраст гранитов, с которыми связывается месторождение, варьирует от 98 до 172 млн лет. Кроме того, высказано предположение [2] о позднепалео-

зойском возрасте месторождения. Ассоциация оруденения с гранитами послужила основанием для вывода о существовании коровом источнике его вещества. Участие других источников в образовании месторождения исследователями не рассматривалось.

Неоднозначность в оценке возраста оруденения и отсутствие данных об источнике вещества руд вызвали необходимость геохронологического и изотопного изучения этого месторождения.

Методы исследований

Диагностика минералов и изотопные составы кислорода в силикатах и кислорода и углерода в карбонате определены в «Аналитическом центре минералого-геохимических и изотопных исследований» Геологического института СО РАН (Улан-Удэ). Однородность и взаимоотношения минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300. Карбонат был разложен ортофосфорной кислотой с использованием опции «Газбенч» при температуре 60–70 °С в течение 2–4 ч. Измерения проведены на масс-спектрометре Finigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбоната проведена по стандартам NBS-18, NBS-19. Величины $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ и $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ определены с погрешностью $\pm 0,05$ и $\pm 0,1$ ‰ (1σ) соответственно.

Кислород из силикатов выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа минералов описана в работе [10], воспроизводимость составляла $\pm 0,1$ – $0,3$ ‰ при 95 %-м доверительном уровне.

Изотопный состав кислорода во флюидах рассчитан в соответствии с фракционированием минерал – вода для мусковита [11], кварца и берилла [12], гюбнерита и шеелита [13], анкерита [14],

хлорита [15]. Температуры, использованные для оценки изотопных составов, взяты из результатов термобарогеохимических исследований [7].

Изотопный состав водорода гидроксильной воды мусковита определен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН. Анализ выполнен по методу, описанному в статье [16]. Для удаления сорбированной воды проба была предварительно нагрета до 200 °С. Конституционная вода выделялась при температуре 1250 °С. Отделение водорода из воды проведено на хrome при температуре 950 °С. Состав его измерен на масс-спектрометре Finigan MAT 253 относительно лабораторного стандарта, калиброванного по международным стандартам VSMOW, SLAP, GISP. Воспроизводимость определения δD (1σ) составляла 1,5 ‰.

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН, частично в Тбилисском государственном университете (М.Ш. Кавиладзе). Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа проведена по методике, описанной в работе [17]. Сера сульфидов окислялась до SO_2 с использованием оксида меди. Реакция окисления проводилась в вакууме при температуре 900 °С. Полученный SO_2 очищался от остальных продуктов реакции на терморегулируемой криогенной ловушке. Очищенный SO_2 вымораживался в отдельную ампулу. Измерение изотопных соотношений серы проведено на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1σ) составляет 0,1 ‰.

Изотопный Re-Os анализ молибденита проведен в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ в лаборатории, специализированной для проведения работ с высоколетучими веществами [18]. При анализе использована методика

химической сепарации и очистки рения и осмия, основанной на методе, предложенном Институтом физики Земли в Париже [19]. Отдельные зерна молибденита массой 0,5–5 мг разлагались в смеси реагентов: 1 мл 7N HNO₃ + 0,5 мл 8N HCl, в 15-миллиметровых кварцевых виалах при температуре 300 °С и давлении 125 атм. в течение 6 ч в печи высокого давления Anton Paar HPA-S [20]. Из полученного раствора после его охлаждения сухим льдом осмий выделялся бромовой экстракцией и микродистилляцией, а рений – жидкостной экстракцией с изоамиловым спиртом [19]. Для определения концентраций рения и осмия и отношения ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os использовался метод изотопного разбавления со смешанным изотопным трассером ¹⁸⁵Re-¹⁹⁰Os, который добавлялся к навескам молибденита до разложения проб. Измерения изотопного состава рения проводились на умножителе масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Element-2 (Thermo Scientific) из раствора 3 % HNO₃ в динамическом режиме регистрации.

При построении Re-Os изохрон использовалась программа Isoplot 3,75 (K. Ludwig) для Excel 2003. При расчетах Re-Os изохрон использовалось фиксированное начальное отношение изотопов осмия ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os = 0, предполагающее отсутствие захваченного при образовании молибденита радиогенного осмия.

Геологическое строение месторождения

Месторождение входит в состав Булуктай-Харацайского рудного узла [2]. Геологическое строение, состав и минералогия его неоднократно освещались в работах [3, 4, 6, 21 и др.]. На месторождении совмещены кварц-молибденитовая и гюбнерит-сульфидно-кварцевая рудные формации. В пределах его установлено трубообразное тело брекчий диаметром 170×200 м (рис. 1), прослеженное скважинами на глубину до 300 м, располагающееся в основном среди верхнепалео-

зойских кварцевых монзонит-сиенитов. В примыкающей к «трубке», кольцевой брекчированной зоне распространено штокверковое оруденение, представленное сетью разноориентированных кварцево-рудных прожилков, молибденитовых и гюбнеритовых жил, имеющих существенно северо-западное направление (см. рис. 1).

Возраст гранитов, с которыми связано оруденение, определен Rb-Sr и K-Ar методами и лежит в интервале 98–172 млн лет [8, 9]. По источнику [2] предполагается, что формирование месторождения происходило в пределах 298–292 млн лет и связано с комплексом субщелочных гранитов.

В радиусе 15 км от месторождения выявлено более 30 участков с кварцевыми жилами и штокверковыми зонами, содержащими вольфрам, молибден, медь, золото, уран, флюорит.

Северная часть месторождения сложена гранитами и гранит-порфирами. Массив этих гранитов к северу прослеживается до 10 км, а к юго-востоку уходит на территорию Монголии. На западе он прорывает карбонатно-терригенную флиш-идную толщу кембро-ордовика, а на юге – гранитоиды верхнего палеозоя. С этим массивом связывают молибден-вольфрамовое оруденение. Кровля массива погружается на юго-запад под углом 30–35° и вскрывается скважинами на глубинах от 50 до 170 м. Производные магматических комплексов представлены дайками мелкозернистых гранитов, диоритовых порфиров и спессартитов. На ранней стадии в эндоконтактной зоне аляскитов образовались пегматоиды. В мелкозернистых и аплитовидных гранитах присутствуют пегматоидные-полевошпатовые и кварц-полевошпатовые шпильки, а также их жилообразные выделения. Эти граниты в районе месторождения относятся к числу более молодых образований. С ними и связано бериллиевое оруденение. Наличие одновременно образовав-

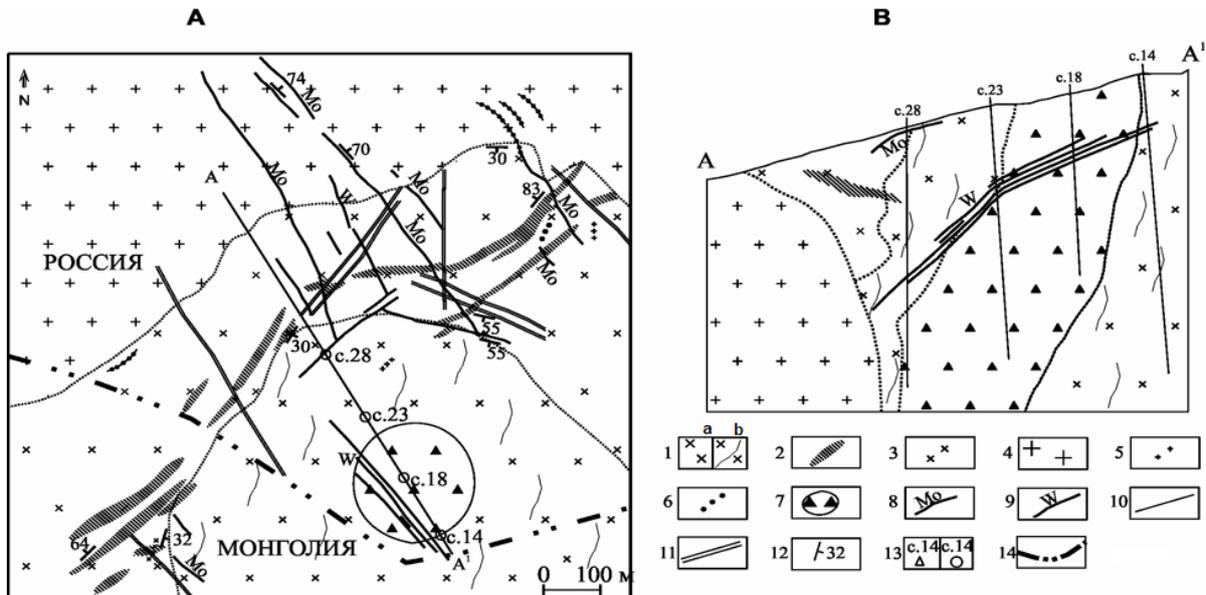


Рис. 1. Схема геологического строения Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (по источнику [21]):

A – план, B – разрез по разведочному профилю–А–А¹

- 1 – верхнепалеозойские кварцевые монзонит-сиениты (а) и их брекчированные разности (b);
 2–3 – дайки верхнего палеозоя: 2 – лампрофйры (одинит-спессартиты), 3 – диорит-порфйриты;
 4 – раннемезозойские аляскитовые граниты и их дайки; 5 – аплиты; 6 – гранит-порфйры;
 7 – полимиктовая брекчия; 8–10 – жилы: 8 – кварц-молибденитовые, 9 – кварц-гюбнеритовые,
 10 – безрудные кварцевые; 11 – тектонические нарушения; 12 – элементы залегания;
 13 – скважины и их номера на разрезе (А), на схеме (В); 14 – государственная граница

Fig. 1. Diagram of the geological structure of the Buluktai molybdenum-tungsten deposit (by the source [21]):

A – plan, B – section along the survey profile A–A¹

- 1 – Upper Paleozoic quartz monzonite-syenites (a) and their brecciated variations (b);
 2–3 – Upper Paleozoic dikes: 2 – lamprophyres (odinite-spessartites); 3 – diorite-porphyrites;
 4 – Early Mesozoic alaskite granites and their dikes; 5 – aplites; 6 – granite-porphyrity;
 7 – polymictic breccia; 8–10 – veins: 8 – quartz-molybdenite, 9 – quartz-hubnerite,
 10 – barren lode quartz; 11 – tectonic dislocations; 12 – dip and strike;
 13 – holes and their numbers on the section (A), on the diagram (B); 14 – state border

шейся вкрапленности флюорита и молибденита в них послужило одним из признаков такой связи.

Трубообразное тело брекчий, согласно источнику [21], возникло на месте пересечения зон повышенной трещиноватости северо-восточного и северо-западного простирания, наложенных на массив верхнепалеозойских гранитов. Эти брекчии представляли благоприятные участки для проникновения гидротермальных растворов, интенсивно переработавших обломочный материал и сформировавших вольфрамово-молибденовое оруденение.

Оруденение образовалось в два этапа – берилл-молибденовый и вольфрамовый с бериллом и сульфидами, разделенные внедрением даек аплитов. В молибденовом этапе выделяются молибденитовая, кварц-молибденитовая и кварц-пиритовая стадии [6].

Внедрение мелкозернистых и аплитовидных гранитов сопровождается высокотемпературными пневмолито-гидротермальными процессами, представленными слюдяными грейзенами и скарноподобными жилами в породах основного состава. Скарновые образования сложены преимущественно амфиболом

и хлоритом с небольшим количеством граната, магнетита, пирита. Грейзены и скарноподобные породы секутся берилл-молибденовыми жилами, а также жилами межрудных аплитов.

На ранней стадии в гранитах образовалась вкрапленность флюорита и молибденита. Позднее сформировалась основная масса молибденового оруденения. Молибденитовые прожилки более всего распространены во внешней зоне оруденелой брекчии, опоясывающей трубчатое сооружение. Богатые вкрапленные молибденитовые руды располагаются в жильных зонах. В позднюю стадию молибденового этапа образовались кварц-пиритовые прожилки, а также жилы кварца с флюоритом и кальцитом.

Вольфрамовое оруденение отделено от молибденового внедрением даек аплитов. Последние сложены кварцем, олигоклазом, микроклином и содержат вкрапленность мусковита, флюорита и пирита. После внедрения аплитов сформировались вольфрамовое и полиметаллическое оруденения. На начальном этапе образовались микроклиновые и кварц-микроклиновые прожилки, пересекающие молибденитовые жилы. Более поздняя кварц-гюбнерит-шеелитовая стадия получила наибольшее распро-

странение. В составе ее выделяется кварц-гюбнерит-сульфидная стадия [6]. Сульфидно-гюбнеритовые жилы секут брекчии трубчатого тела монцитонитиды верхнего палеозоя, а сами они секутся жилами флюорита и халцедоновидного кварца.

По данным термобарогеохимических исследований [7], молибденитовый этап сформировался при температурах от 200 до более 480 °С, минерализация в дайках аплитов – 280–380 °С, вольфрамитовое оруденение – 230–390 °С, ассоциация низкотемпературного флюорита и кварца – 200–300 °С. Схема последовательного образования месторождения представлена в табл. 1. Она показывает, что минеральные ассоциации Булуктаевского месторождения сформировались в три этапа. В два первые были образованы высоко- и среднетемпературные берилл-молибденовые и кварц-гюбнерит-шеелитовые руды, в третий в близповерхностных условиях образовались низкотемпературные флюоритовые жилы с халцедоновидным и гребенчатым кварцем. Последние по составу и условиям образования идентичны флюоритовым месторождениям Монголии, Восточного и Западного Забайкалья [22–24].

Таблица 1
Последовательность формирования руд Булуктаевского месторождения
Table 1
Formation sequence of Buluktai deposit ores

Этап	Стадия	T, °С
Молибденитовый	Пегматоидная	
	Грейзеновая	480–390
	Молибденитовая	340–290
	Кварц-молибденитовая	340–280
	Кварц-пиритовая	280–200
Внедрения даек аплитов	–	380–280
Вольфрамитовый	Полевошпатовая и кварц-полевошпатовая	390–260
	Кварц-гюбнерит-шеелитовая	380–260
	Кварц-флюорит-шеелитовая	320–230
Низкотемпературного флюорита и халцедоновидного кварца	Крупнозернистого флюорита, гребенчатого и халцедоновидного кварца	300–200

Примечание. Температура T дана по источнику [7].
Note. The temperature T is given by source [7].

Результаты изотопных исследований

На месторождении проведена оценка возраста (Re-Os) рудного этапа и изучены изотопные составы кислорода, серы, водорода и углерода различных стадий минералообразования. На основе данных термобарогеохимических исследований [7] рассчитан изотопный состав кислорода во флюиде, равновесном с минералами рудного и пострудного этапов.

Изохронный Re-Os возраст молибденита. Re-Os датирование проведено по молибдениту (проба Бул-617) из

кварц-молибденитового прожилка (табл. 2). С молибденитом ассоциируют пирит, галенит и сфалерит. В пробе содержится 14,5–17,7 ppm рения. Рассчитанная по фракциям молибденита изохрона дала возраст 144 ± 10 млн лет (рис. 2).

Изотопный состав серы. Изотопные составы сульфидной серы пирита, молибденита, сфалерита и галенита как молибденового, так и вольфрамового этапа в целом гомогенны (табл. 3, рис. 3), ложатся в интервал значений, близкий к значениям мантийного источника. При этом отмечается несколько большая обогащенность молибденита тяжелой серой.

Таблица 2

Результаты Re-Os изотопных анализов молибденита Булуктаевского месторождения

Table 2

Results of Re-Os isotope analyzes of molybdenite sample from the Buluktai deposit

Номер точки	M, mg	Re, ppm	¹⁸⁷ Re, ppb	¹⁸⁷ Os, ppb	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os (±2d %)	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os (±2d %)	T model, Ma
4853	1,25	17,7	11108	26,57	36 5617 ± 0,5	88 ± 1,19	143
4854	1,89	16,1	10096	24,26	43 647 ± 0,6	105 ± 2,55	144
4855	2,36	16,0	10055	22,79	15 639 ± 0,6	36 ± 0,93	136

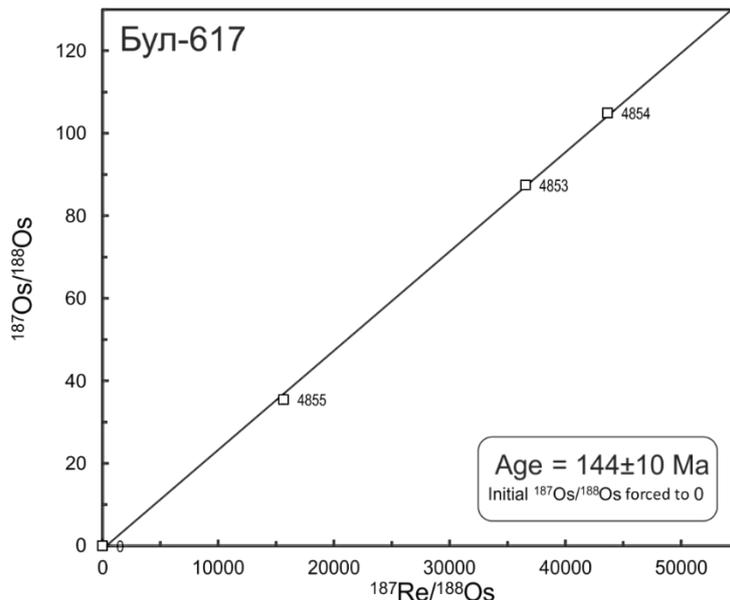


Рис. 2. Изохронная Re-Os диаграмма для пробы молибденита Булуктаевского месторождения
Fig. 2. Isochronic Re-Os diagram for molybdenite sampling material of the Buluktai deposit

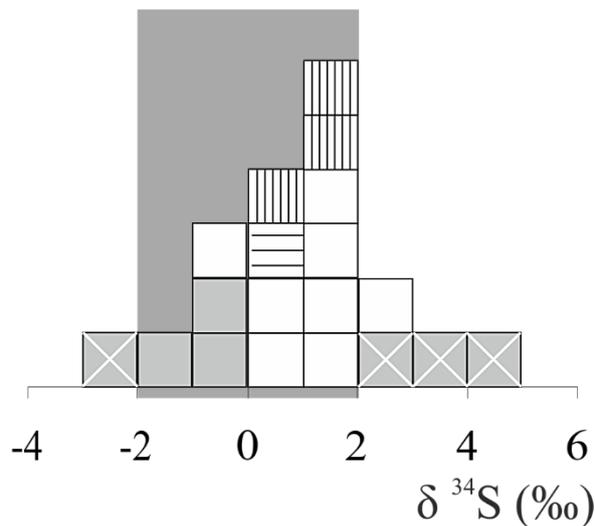
Таблица 3

Изотопный состав серы Булуктаевского месторождения

Table 3

Isotopic composition of sulfur from the Buluktai deposit

Этап	Номер пробы	Минерал	$\delta^{34}\text{S} \text{‰}_{\text{CDT}}$
Молибденовый	Бл-26	Молибденит	-2,7
	Бул-55		3,26
	66а		2,84
	64а		4,2
	230/1-53	Пирит	-1,1
	Бл-1а		-0,45
	230/394		-0,61
Вольфрамовый	Бул-1	Пирит	1,2
	230		1,75
	230/с-х-1а		0,7
	230-18-20		0,5
	252/16		-0,1
	1089-76		2,19
	1087		1,81
	1087а		1,8
	230/501		Галенит
	230/с-х-1	Сфалерит	0,4
	Бл-2		1,5
	230/501а		2



Молибденовый этап: Молибденит Пирит
 Вольфрамовый этап: Галенит Сфалерит Пирит

Рис. 3. Диаграмма изотопных составов сульфидной серы ($\delta^{34}\text{S}\text{‰}_{\text{CDT}}$) Булуктаевского месторождения

Заштриховано поле мантийного источника серы

Fig. 3. Diagram of the isotopic compositions of sulfide sulfur ($\delta^{34}\text{S}\text{‰}_{\text{CDT}}$) of the Buluktai deposit

The field of mantle sulfur is shaded

Изотопный состав кислорода. Результаты анализов изотопных составов кислорода молибденового, вольфрамового и пострудного этапов представлены в табл. 4 и на рис. 4. Кислород их четко разделяется на две группы. В одну из них входят начальные более высокотемпературные ассоциации, включающие берилл и мусковит. Это грейзен и слюдяные оторочки на контактах рудных жил. Составы их, так же, как рассчитанные значения $\delta^{18}\text{O}$ равновесной с ними флюидной фазы, близки к значениям мантийного источника (рис. 4, 5). Вторую группу представляют минералы рудных стадий. Кварц как молибденового, так и вольфрамового этапа заметно обогащен тяжелым кислородом (см. табл. 4). Состав кислорода флюидов, равновесных с этим минералом (см. рис. 5), фиксирует обогащенность легким изотопом. Легким кислородом обогащены и флюиды, рав-

новесные с гюбнеритом, шеелитом, хлоритом. Изотопный состав кислорода и углерода в анкерите попадает в квадрат PIC.

Обсуждение

Результат Re-Os датирования по молибдениту подтвердил предположение о позднемезозойском возрасте оруденения. Он заметно отличается от возраста гранитов, с которым связывается месторождение. Полученное значение близко с Re-Os возрастом Ореkitканского молибденового месторождения ($142,2 \pm 0,8$ млн лет [25]) и Гуджирских гранитов Джидинского молибден-вольфрамового месторождения (120–125 млн лет [26, 27]). Из известных данных по геохронологии [9] (143 ± 4 млн лет) только граниты близки к возрасту руд. Полученные данные не согласуются с предположением [2] о позднепалеозойском возрасте оруденения.

Таблица 4

Изотопный состав кислорода, водорода и углерода в минералах Булуктаевского месторождения

Table 4

Isotopic composition of oxygen, hydrogen and carbon in the minerals of the Buluktai deposit

Этап	Минерал	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰VSMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	$\delta\text{D}_{\text{‰VSMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰fluid}}$	T, °C
Молибденовый	Мусковит	5,6	–	–	5,9	430
		5,9	–	-144,3	6,2	430
	Берилл	6,7	–	–	7,1	340
	Кварц	9,1	–	–	3,3	340
		7,2	–	–	1,4	340
		8,3	–	–	2,5	340
		9,3	–	–	3,5	340
Вольфрамовый	Берилл	6,4	–	–	6,3	310
	Кварц	8,9	–	–	2,2	310
		8,1	–	–	1,4	310
		7,9	–	–	1,2	310
	Гюбнерит	-2,1	–	–	-0,2	310
		-3,72	–	–	-1,82	310
	Шеелит	0,9	–	–	-1,8	200
Анкерит	7,54	-4,99	–	–	–	
Пострудный	Хлорит	2,6	–	–	-1,4	150

Примечание. При расчете состава кислорода флюидов использованы температуры термобарогеохимического изучения [7].

Note. The temperatures of the thermobarogeochemical study were used to calculate the fluid oxygen composition [7].

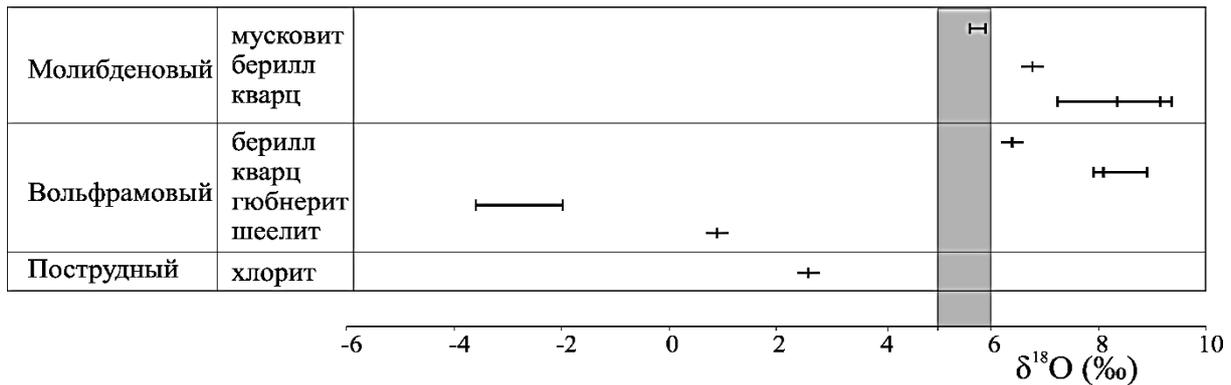


Рис. 4. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}\text{‰VSMOW}$) в минералах Булуктайского месторождения
 Fig. 4. Isotopic composition of oxygen ($\delta^{18}\text{O}\text{‰VSMOW}$) in the minerals of the Bulukhtai deposit

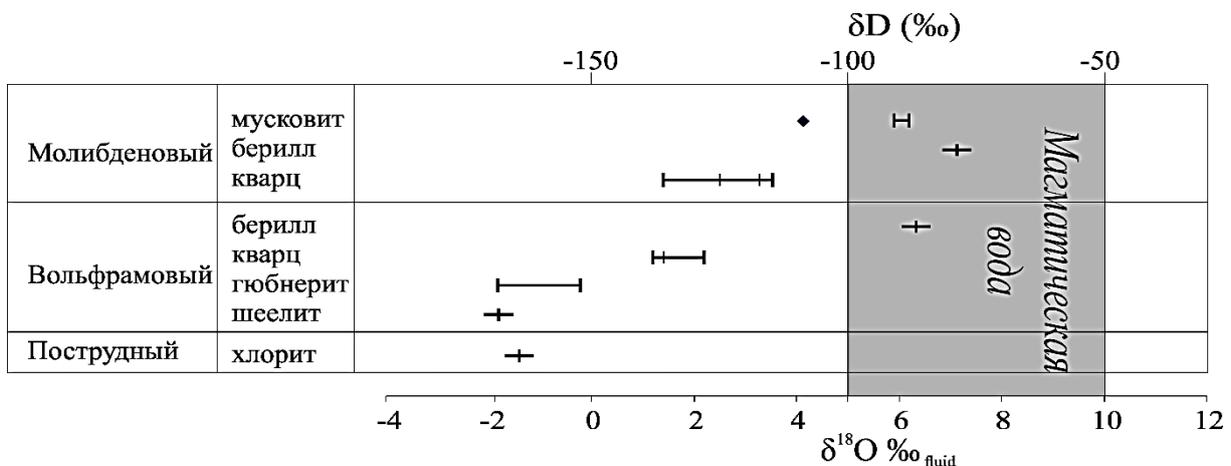


Рис. 5. Изотопные составы кислорода ($\delta^{18}\text{O}\text{‰fluid}$) и водорода ($\delta\text{D}\text{‰VSMOW}$) во флюидах Булуктаевского месторождения
 Fig. 5. Isotopic compositions of oxygen ($\delta^{18}\text{O}\text{‰fluid}$) and hydrogen ($\delta\text{D}\text{‰VSMOW}$) in the fluids of the Bulukhtai deposit

По данным анализа изотопных составов сульфидной серы отчетливо фиксируется ее мантийное происхождение. При этом отмечается заметное обогащение тяжелым изотопом в молибдените относительно других сульфидов. Подобные мантийные метки наблюдаются и на других молибденовых и вольфрамовых месторождениях Джидинского рудного узла (Первомайское, Инкурское, Холтосонское и Орехитканское) [28, 29].

Изотопный состав кислорода указывает на участие мантийного и корового вещества в продуктах рудообразования. При этом мантийный источник фиксируется на ранних этапах рудообразования, а коровый преобладал при формировании гидротермалитов. Последнее

подтверждается расчетом состава кислорода во флюиде, равновесном с рудообразующими минералами, показывающими (см. рис. 5) обогащенность его легким кислородом. Метеорный источник воды зафиксирован и в хлорите, завершающем процесс гидротермального минералообразования. Существенная деплетированность дейтерием гидроксильной воды в мусковите также подтверждает вовлечение в рудообразующий процесс воды метеорного источника.

О глубинном происхождении углекислоты свидетельствуют составы кислорода и углерода в анкерите из трубчатого тела, лежащие в квадрате PIC. Они подобны составам кислорода и углерода в карбонатах вольфрамоносных жил

Джидинского рудного поля [28].

Выводы

1. Методом изотопного Re-Os анализа молибденита установлен позднемезозойский возраст молибденового оруденения Булуктаевского месторождения.

2. Комплексное изотопное изучение минералов свидетельствует о том, что в формировании оруденения участвовало вещество мантийного источника, а в процесс рудообразования были вовлечены флюиды метеорного происхождения.

Библиографический список

1. Дондоков З.Б.-Д., Потапов Л.В., Кислов Е.В. Минерально-сырьевой комплекс Республики Бурятия: состояние и перспективы развития // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 6. С. 43–51.

2. Гордиенко И.В., Гороховский Д.В., Смирнова О.К., Ланцева В.С., Бадмацыренова Р.А., Орсов Д.А. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 1. С. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>.

3. Коржинский А.Ф., Фрацкая Е.В. О позднем выделении молибденита на Булуктаевском месторождении Юго-Западного Забайкалья // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. 1958. № 6. С. 46–53.

4. Вахромеев С.А., Иньшин Е.Д., Корятова Д.М. О геолого-структурных и генетических особенностях Булуктаевского молибдено-вольфрамового месторождения // Записки Восточно-Сибирского отделения Всесоюзного минералогического общества. Иркутск. 1962. Вып. 3. С. 19–34.

5. Туговик Г.И. Стадии гидротермальной минерализации и генезис молибдено-вольфрамовых месторождений Джидинского рудного узла // Геология и геофизика СО АН СССР. 1964. № 2. С. 93–104.

6. Рипп Г.С. Новые данные о стадийности в формировании Булуктаев-

ского молибдено-вольфрамового месторождения // Материалы по геологии и полезным ископаемым Бурятской АССР. 1966. Вып. X. С. 155–168.

7. Kosals Ya.A., Dmitriyeva A.N. Sequences and temperatures in formation of the Bulukhtay molybdenum-tungsten deposit (Southwestern Transbaykal) // International Geology Review. 1973. Vol. 15. №. 1. P. 25–30.

8. Батурина Е.Е., Рипп Г.С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья. М.: Наука, 1984. 152 с.

9. Бузкова Н.Г. Новые данные о соотношении гранитоидного магматизма с эндогенным оруденением (на примере Булуктаевского массива в Западном Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338. № 6. С. 793–797.

10. Sharp Z.D. A laser-based micro-analytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1990. № 54. P. 1353–1357.

11. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // Earth and Planetary Science Letters. 1993. № 120. P. 247–263.

12. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. № 57. P. 1079–1091.

13. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in wolframite // European Journal of Mineralogy. 1992. № 4. P. 1331–1335.

14. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // Geochemical Journal. 1999. № 33.

P. 109–126.

15. Wenner D.B., Taylor H.P. Jr. Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation between coexisting serpentine and magnetite // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1971. № 32. P. 165–185.

16. Vennemann T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent // *Chemical Geology*. 1993. № 103. P. 227–234.

17. Гриненко В.А. Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // *Журнал неорганической химии*. 1962. Т. 7. С. 578–582.

18. Крымский Р.Ш., Сергеев Д.С., Брюгманн Г.Э., Шевченко С.С., Антонов А.В., Беляцкий Б.В., Капитонов И.Н., Сергеев С.А. Опыт изучения изотопного состава осмия и распределения элементов платиновой группы в перидотитах литосферной мантии Восточной Антарктиды // *Региональная геология и металлогения*. 2011. № 46. С. 51–60.

19. Birck J.L., Barman M.R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples // *Geostandards Letters*. 1997. Vol. 20. № 1. P. 19–27.

20. Paliulionyte V., Meisel Th., Ramming P., Kettisch P. High pressure asher digestion and an isotope dilution-ICP-MS method for the determination of platinum-group element concentrations in chromitite reference materials CHR-Bkg, GAN Pt-1 and HNH // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2006. Vol. 30. P. 87–96.

21. Туговик Г.И. Эксплозии и рудный процесс. М.: Недра, 1974. 208 с.

22. Жамсран М., Лхамсурен Ж., Оболенский А.А., Бадамгарав Ж., Батжаргал Ш., Оболенская Р.В., Тумэнбаяр Б., Цоодол Б., Шийтэр Н. Металлогения Монгольской Национальной Республики (флюорит). Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1986. 48 с.

23. Булнаев К.Б. Флюоритовые месторождения Западного Забайкалья (металлогенический анализ). Новосибирск: Наука, 1976. 128 с.

24. Иванова А.А. Флюоритовые месторождения Восточного Забайкалья: условия формирования и закономерности размещения. М.: Недра, 1974. 208 с.

25. Mironov A., Stein H., Zimmerman A., Yang G. Re-Os dating of the Orekitkan molybdenum deposit (Russia) // *Understanding the genesis of ore deposits to meet the 21st century, 12th Quadrennial IAGOD Symposium*. Vol. 1. File 065. Moscow, 21–24 August 2006.

26. Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Мухин В.Н., Сулова С.В., Платова Е.В., Большакова Т.В., Шеломенцева Т.И. Объяснительная записка листа М-48 – Улан-Удэ, серия Алдано-Забайкальская. СПб.: Министерство природных ресурсов России, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. 276 с.

27. Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.В., Иванова Г.Ф. Rb-Sr геохронология процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Mo месторождение, Западное Забайкалье // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 360. № 4. С. 537–740.

28. Рипп Г.С., Смирнова О.К., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Посохов В.Ф. К проблеме источников вещества месторождений Джидинского рудного поля (по данным изотопных исследований) (Западное Забайкалье) // *Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы IX Всерос. конф. с междунар. уч. Вып. 9. Томск, 28 ноября – 2 декабря 2017 г. Томск, 2017. С. 371–375.*

29. Рипп Г.С. Геохимия эндогенного оруденения и критерии прогноза в складчатых областях. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.

References

1. Dondokov Z.B.-D., Potapov L.V., Kislov E.V. The mineral resource sector in the Republic of Buryatia: current state and further development. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2015, no. 6, pp. 43–51. (In Russian).
2. Gordienko I.V., Gorokhovskii D.V., Smirnova O.K., Lantseva V.S., Badmatyrenova R.A., Orsoev D.A. Dzhida ore district: geology, structural and metallogenic regionalization, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecast, and outlook for development. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2018, vol. 60, no. 1, pp. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>. (In Russian).
3. Korzhinskii A.F., Fratskaya E.V. On the late release of molybdenite at the Buluktai deposit of the South-Western Transbaikalia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences], 1958, no. 6, pp. 46–53. (In Russian).
4. Vakhromeev S.A., In'shin E.D., Korytova D.M. On the geological-structural and genetic features of the Buluktai Mo-W deposit. *Zapiski Vostochno-Sibirskogo otdeleniya Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the East-Siberian Department of the All-Russian Mineralogical Society]. Irkutsk, 1962, issue 3, pp. 19–34.
5. Tugovik G.I. Hydrothermal mineralization stages and genesis of molybdenum-tungsten deposits of the Dzhida ore cluster. *Geologiya i geofizika SO AN SSSR* [Geology and Geophysics SB AS USSR], 1964, no 2, pp. 93–104. (In Russian).
6. Ripp G.S. *Novye dannye o stadiinosti v formirovanii Buluktaevskogo molibdeno-vol'framovogo mestorozhdeniya* [New data on staging in the formation of the Buluktai Mo-W deposit]. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Buryatskoi ASSR* [Materials on Geology and Minerals of the Buryat ASSR], 1966, issue X, pp. 155–168. (In Russian).
7. Kosals Ya.A., Dmitriyeva A.N. Sequences and temperatures in formation of the Buluktai molybdenum-tungsten deposit (Southwestern Transbaikalia). *International Geology Review*, 1973, vol. 15, no. 1, pp. 25–30.
8. Baturina E.E., Ripp G.S. *Molibdenovye i vol'framovye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaikal'ya* [Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia]. Moscow: Nauka Publ., 1984, 152 p. (In Russian).
9. Buzkova N.G. New data on granitoid magmatism and endogenic mineralization relationship (on example of the Buluktai massif in the Western Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1994, vol. 338, no. 6, pp. 793–797. (In Russian).
10. Sharp Z.D. A laser-based micro-analytical method for the in-situ determination of ox-ygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, no. 54, pp. 1353–1357.
11. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, no. 120, pp. 247–263.
12. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, no. 57, pp. 1079–1091.
13. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in wolframite. *European Journal of Mineralogy*, 1992, no. 4, pp. 1331–1335.
14. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochemical Journal*, 1999, no. 33, pp. 109–126.
15. Wenner D.B., Taylor H.P. Jr. Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation

between coexisting serpentine and magnetite. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1971, no. 32, pp. 165–185.

16. Vennemann T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. Chemical Geology, 1993, no. 103, pp. 227–234.

17. Grinenko V.A. Sulfur dioxide preparation for isotopic analysis. Zhurnal neorganicheskoi khimii [Russian Journal of Inorganic Chemistry], 1962, vol. 7, pp. 578–582. (In Russian).

18. Krymskii R.Sh., Sergeev D.S., Bryugmann G.E., Shevchenko S.S., Antonov A.V., Belyatskii B.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. Experience of studying the isotopic composition of osmium and the distribution of platinum group elements in the peridotites of the lithospheric mantle of East Antarctica. Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny], 2011, no. 46, pp. 51–60. (In Russian).

19. Birck J.L., Barman M.R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples. Geostandards Letters, 1997, vol. 20, no. 1, pp. 19–27.

20. Paliulionyte V., Meisel Th., Ramming P., Kettisch P. High pressure asher digestion and an isotope dilution-ICP-MS method for the determination of platinum-group element concentrations in chromitite reference materials CHR-Bkg, GAN Pt-1 and HHH. Geostandards and Geoanalytical Research, 2006, vol. 30, pp. 87–96.

21. Tugovik G.I. *Eksplozii i rudnyi protsess* [Explosions and the ore process]. Moscow: Nedra Publ., 1974. 208 p. (In Russian).

22. Zhamsran M., Lkhamsuren Zh., Obolenskii A.A., Badamgarav Zh., Batzharгал Sh., O6olenskaya R.V., Tumenbayar B., Tsoodol B., Shiiter N. *Metallogeniya Mongol'skoi Natsi-onal'noi Respubliki (flyuorit)* [Metallogeny of the Mongolian National Republic (Fluorite)]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 48 p. (In Russian).

23. Bulnaev K.B. *Flyuoritovye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaikal'ya (metallogenicheskii analiz)* [Fluorite deposits of the Western Transbaikalia: metallogenic analysis]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976, 128 p. (In Russian).

24. Ivanova A.A. *Flyuoritovye mestorozhdeniya Vostochnogo Zabaikal'ya: usloviya formirovaniya i zakonomernosti razmeshcheniya* [Fluorite deposits of the Eastern Transbaikalia: formation conditions and distribution patterns]. Moscow: Nedra Publ., 1974, 208 p. (In Russian).

25. Mironov A., Stein H., Zimmerman A., Yang G. Re-Os dating of the Orekitkan molybdenum deposit (Russia). Understanding the genesis of ore deposits to meet the 21st century, 12th Quadrennial IAGOD Symposium. Vol. 1, file 065. Moscow, 21–24 August 2006.

26. Platov V.S., Savchenko A.A., Ignatov A.M., Gorokhovskii D.V., Shor G.M., Alekseenko V.D., Mukhin V.N., Suslova S.V., Platova E.V., Bol'shakova T.V., Shelomentseva T.I. Ob'yasnitel'naya zapiska lista M-48 – Ulan-Ude, seriya Aldan-Zabaikal'skaya) [Explanatory note of the M-48 - Ulan-Ude, Aldan-Transbaikalian series sheet. Ministry of Natural Resources of Russia, Cartography Factory VSEGEI (St. Petersburg)]. Saint-Petersburg: Ministry of Natural Resources of Russia, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2009, 276 p. (In Russian).

27. Chernyshev I.V., Gol'tsman Yu.V., Bairova E.V., Ivanova G.F. Rb-Sr geochronology of the processes of consecutive formation of granites, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhida W-Mo deposit, Western Transbaikalia. Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences], 1998, vol. 360, no. 4, pp. 537–740. (In Russian).

28. Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. *K probleme istochnikov veshchestva mestorozhdenii Dzhidinskogo rudnogo polya (po dannym izotopnykh*

issledovanii) (Zapadnoe Zabaikal'e) [To the problem of matter sources of Dzhida ore field deposits (according to isotopic research data) (Western Transbaikalia)]. *Materialy IX Vseros. konf. s mezhdunar. uch. "Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov"* [Materials of IX All-Russian Conference with International Participation "Petrology of igneous and

metamorphic complexes"]. Issue. 9. Tomsk, 28 November – 2 December 2017. Tomsk, 2017, pp. 371–375. (In Russian)

29. Ripp G.S. *Geokhimiya endogenogo orudneniya i kriterii prognoza v skladchatykh oblastiakh* [Geochemistry of endogenous mineralization and forecasting criteria in folded areas]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 192 p. (In Russian).

Критерии авторства

Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Savchenko A.A., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Posokhov V.F. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 556.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-22-36>

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БАКЧАРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОДОПРИТОКОВ

© К.И. Кузеванов^а, К.К. Кузеванов^б, Е.М. Дутова^с, В.Д. Покровский^д

^{а-д}Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация, г. Томск, просп. Ленина, 30.

РЕЗЮМЕ: Бакчарское железорудное месторождение на территории Томской области относится к одному из крупнейших в мире железорудных районов – Западно-Сибирскому. Протяженность рудоносной полосы в направлении с юга на север достигает 2000 км при ширине до 150 км. К настоящему времени наиболее детально изучена часть этой провинции, находящаяся в районе д. Полынянки Бакчарского района. Поисковые работы выполнены в составе государственной геологической съемки. Выявлено относительно глубокое залегание рудных тел, а также высокая степень обводненности всего геологического разреза. Однако интерес к освоению железорудного сырья сохраняется, поскольку его огромные запасы являются мощным ресурсом развития региона на перспективу. Гидрогеологические условия месторождения во многом определяют наиболее рациональные способы его разработки и рентабельность добычи полезного ископаемого. Цель данной статьи – оценка прогнозных водопритоков и их изменения во времени при открытом способе отработки железорудного месторождения, которая необходима для предварительного определения масштабов работ по водопонижению и схемы их организации, включая выбор приемников дренажных вод. В ходе работы проанализированы особенности геологического строения до глубины залегания рудных тел. Выполнена схематизация гидрогеологического разреза для целей прогнозного аналитического гидродинамического расчета водопритоков. Получена предварительная оценка водопритоков на перспективу при открытом способе разработки месторождения с учетом изменения интенсивности дренажа подземных вод во времени. Результаты прогнозных расчетов показывают весьма значительную степень обводненности железорудного месторождения. Необходимо дальнейшее изучение гидрогеологических условий, поиск и обоснование альтернативных методов разработки месторождения, включая скважинную гидродобычу.

Ключевые слова: Бакчарское железорудное месторождение, открытый способ отработки, подземные воды, водоносный горизонт, фильтрационные параметры, фильтрационный поток, расход, водоприток, геофильтрационные расчеты

Информация о статье: Дата поступления 2 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 6 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Кузеванов К.И., Кузеванов К.К., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Гидрогеологические условия Бакчарского железорудного месторождения и предварительная оценка водопритоков. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):22–36. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-22-36.

^аКузеванов Константин Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии, e-mail: kki@tpu.ru

Konstantin I. Kuzevanov, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Geology Department, e-mail: kki@tpu.ru

^бКузеванов Константин Константинович, ассистент отделения геологии, e-mail: kuzevanovkk@mail.ru
Konstantin K. Kuzevanov, Assistant Professor of the Geology Department, e-mail: kuzevanovkk@mail.ru

^сДутова Екатерина Матвеевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии, e-mail: dutova@tpu.ru

Ekaterina M. Dutova, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor of the Geology Department, e-mail: dutova@tpu.ru

^дПокровский Виталий Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии, e-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

Vitaly D. Pokrovskiy, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Geology Department, e-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE BAKCHAR IRON ORE DEPOSIT AND PRELIMINARY ESTIMATION OF WATER INFLOWS

© Konstantin I. Kuzevanov^a, Konstantin K. Kuzevanov^b,
Ekaterina M. Dutova^c, Vitaly D. Pokrovskiy^d

^{a-d}Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin pr., Tomsk 634050, Russian Federation

ABSTRACT: The Bakchar iron ore deposit located in the Tomsk region is a part of the West-Siberian iron ore field, which is considered one of the largest in the world. The length of the ore-bearing strip from the south to the north is about 2,000 km, the strip width is about 150 km. At present, the most detailed research was given to the part of the Bakchar province adjoining Polynyanka village. The explorations were performed as a part of the state geological survey. A relatively deep underlying of ore bodies and a high watering degree of the entire geological section were found out. However, this did not decrease the interest in the development of iron ore since its huge reserves form the powerful resource for the development of the region in the future. Hydrogeological conditions of the deposit in many senses determine the most rational methods of its development and ore mining profitability. The purpose of the article is to estimate the forecasted water inflows and their changes over time under open-cast mining of the iron ore deposit. It is required for the preliminary determination of the scope of works for water lowering and designing of their organization scheme including the selection of drainage water receivers. The paper also analyzes the features of the geological structure down to the depth of ore body bedding. The hydrogeological profile of the section has been schematized for the purpose of predictive analytical hydrodynamic calculation of water inflows. The preliminary estimation of water inflows for the future has been obtained under open-cast mining of the deposit with regard to the change of the groundwater drainage intensity over time. The results of predictive calculations show the significant degree of iron ore deposit watering. The authors emphasize the need for further study of hydrogeological conditions, search and justification of alternative methods of ore field development including hydraulic bore-hole mining.

Keywords: Bakchar iron ore deposit, open-cast mining method, groundwater, aquifer, filtration parameters, filtering flow, flow, water inflow, geofiltration calculations

Information about the article: Received November 2, 2018; accepted for publication December 6, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kuzevanov K.I., Kuzevanov K.K., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D. Hydrogeological conditions of the Bakchar iron ore deposit and preliminary estimation of water inflows. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2018;41(4):22–36 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-22-36.

Введение

На территории Томской области открыто Бакчарское железорудное месторождение, которое относится к одному из крупнейших в мире железорудных бассейнов – Западно-Сибирскому [1, 2]. Он представляет собой сохранившуюся от размыва восточную часть огромной прерывистой полосы железоруднения, подковой окаймляющей Западно-Сибирскую низменность (рис. 1). На западном обрамлении этой структуры аналогичные морские руды известны в Аятском,

Марсятском и других месторождениях. Пространственное близки к ним лагунно-озерные руды Прииртышского бассейна и речные руды Лисаковского месторождения Приаральской группы. Морские рудоносные породы и руды Западно-Сибирского бассейна протягиваются с юга на север почти от предгорий Алтая на юге до полуострова Олений в низовьях р. Енисей. Протяженность рудоносной полосы близка к 2000 км при ширине около 150 км. К настоящему времени наиболее детально изучена часть этой

провинции, находящаяся в районе д. Польшанки Бакcharского района. Железные отложения Бакcharского рудного узла приурочены к верхнемеловым и палеогеновым отложениям, перекрывающимся мощной толщей (160–200 м) осадков неоген-четвертичного возраста. Железные руды характеризуются в основном оолитами гетит-гидрогетитового, хлорит-гидрогетитового состава и относятся к трем горизонтам (снизу вверх): нарымскому, колпашевскому, бакcharскому [3–6]. Состав оолитов руд близок к составу современных новообразующихся оолитов на фильтрах обезжелезивания водозаборов, эксплуатирующих воды палеогеновых отложений [7, 8]. Поисковые работы на территории рудного узла вы-

полнены в составе государственной геологической съемки. Выявлены относительно глубокое залегание рудных тел и высокая степень обводненности всего геологического разреза. Однако интерес к освоению железорудного сырья сохраняется, поскольку его огромные запасы являются мощным ресурсом развития экономики Томской области на перспективу. В этой связи исследование гидрогеологических условий месторождения является одной из приоритетных задач геолого-разведочных работ, поскольку наличие в разрезе подземных вод во многом определяет выбор наиболее рациональных способов разработки рудного сырья и в целом рентабельность добычи полезного ископаемого.

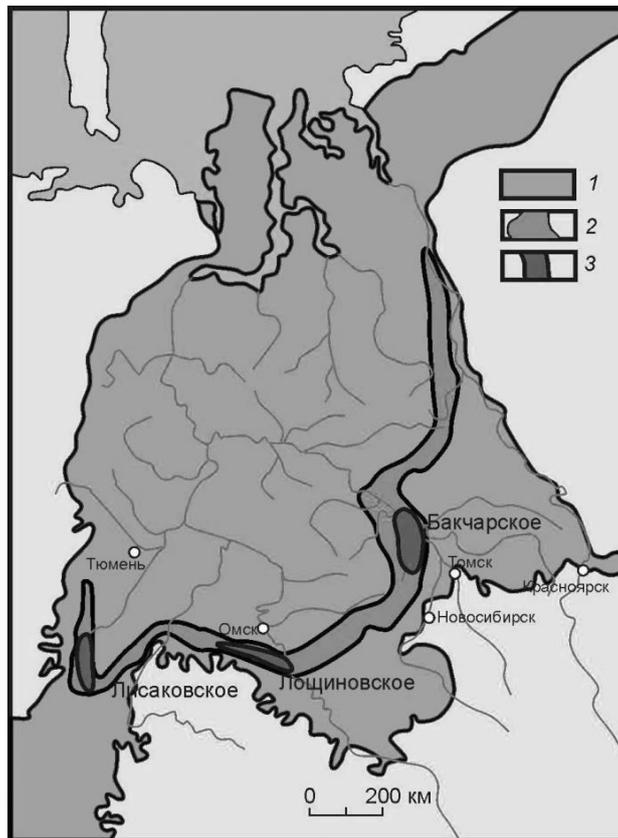


Рис. 1. Схема Западно-Сибирского железорудного бассейна [2–4]:
1 – площадь распространения мел-палеогенового моря; 2 – полоса распространения прибрежно-морских железорудных отложений; 3 – площади наиболее крупных железорудных узлов (месторождений)

Fig. 1. Diagram of the West Siberian iron ore basin [2–4]:
1 – distribution area of the Cretaceous-Paleogene sea; 2 – distribution area of the coastal-marine iron ore deposits; 3 – areas of the largest iron ore clusters (deposits)

Площадь исследований расположена в Бакчарском районе Томской области в 219 км юго-западнее г. Томска вблизи районного центра Бакчар. Географически район находится на восточном склоне Обь-Иртышского междуречья центральной части Западно-Сибирской низменности. В геоморфологическом отношении район работ расположен на Обь-Иртышском водоразделе, в долинном комплексе р. Парбиг и Бакчар, которые являются левыми притоками р. Чая.

Площадь месторождения представляет собой заболоченную и слабо всхолмленную равнину с абсолютными отметками от 121 м на водораздельных участках до 89 м в речных долинах (р. Галка и Тетеринка, являющихся левыми притоками р. Бакчар). Территория покрыта лесами таежного типа. Широко развиты обширные болотные массивы.

Климат района континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом. Среднегодовая температура колеблется от -0,7 до 1,6 °С. Среднегодовое количество осадков изменяется от 560 до 600 мм. Снежный покров достигает 130 см и держится до начала мая. Максимальная глубина сезонного промерзания наступает в конце марта и достигает 280 см.

По природно-климатическим условиям район Бакчарского железорудного месторождения относится к Западно-Сибирской провинции южнотаежной подзоны и характеризуется избыточным увлажнением, плоским слаборасчлененным рельефом, слабо развитой гидросетью с малыми уклонами русел, широким развитием процессов заболачивания.

Цель исследования

Имеющиеся материалы гидрогеологических исследований положены в основу предварительной оценки прогнозных водопритоков при открытом способе отработки железорудного месторождения. Количественная оценка масштабов водопритоков и их ожидаемое изменение

во времени при расширении фронта добычных работ необходимы для предварительного определения масштабов работ по водопонижению и схемы их организации, включая выбор возможных приемников дренажных вод. Оценка водопритоков требует особого внимания и является обязательным регламентом при эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых [9–15].

Материалы и методы исследования

В основу анализа гидрогеологических условий Бакчарского железорудного месторождения положены материалы региональной оценки ресурсов пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна [16], а также результаты гидрогеологических исследований для организации централизованного водоснабжения населенных пунктов южных районов Томской области [17].

В региональном плане гидрогеологический разрез характеризуется двухэтажным строением, объединяющим две гидродинамические зоны: интенсивного и затрудненного водообмена. Затрудненный водообмен характерен для нижней части гидрогеологического разреза, граница которой подтверждается гидрогеохимическими показателями и прежде всего повышенной величиной общей минерализации подземных вод, превышающей предел первых граммов на литр.

Максимальная мощность зоны интенсивного водообмена достигает 800 м. При залегании рудной толщи на глубинах, близких к 200 м, участок месторождения, планируемый к первоочередной отработке, попадает в пределы зоны активного водообмена. Этим обстоятельством во многом определяются особенности формирования водопритоков при открытом способе отработки продуктивной толщи.

Гидрогеологический разрез характеризуется наличием нескольких выдер-

жанных в плане и в разрезе мощных водоносных горизонтов, часть из которых используется для организации централизованного водоснабжения населенных пунктов. Подземные воды этих горизонтов являются частью единой гидродинамической системы Западно-Сибирского артезианского бассейна, что предопределяет высокие величины ожидаемых водопритоков при открытом способе разработки. Водоносные горизонты, содержащие напорные воды, разделены водоупорами, выдержанными в разрезе и по площади. Величины напоров формируются в отдаленных областях питания и часто устанавливаются на уровне, близком к поверхности современного рельефа, что иногда приводит к образованию участков самоизлива в долинах рек.

В работе Н.А. Ермашовой [17] приведена обобщенная характеристика гидрогеологического разреза в районе д. Польшнянки Бакчарского района. Исходными материалами послужили результаты поисковых работ, выполненных в составе государственной геологической съемки (А.А. Бабин), и уточненная характеристика, полученная при гидрогеологической съемке, выполненной Обской партией Томской геолого-разведочной экспедиции (А.В. Кривенцов, Т.Г. Кривенцова). В работе использованы эти материалы и описание водоносных горизонтов для схематизации гидрогеологических условий и выполнения прогнозных геофильтрационных расчетов.

Согласно материалам полевых исследований, в пределах надрудной части гидрогеологического разреза выделяется четыре напорных водоносных горизонта, разделенных выдержанными в плане и в разрезе водоупорными породами (рис. 2).

Первый от поверхности постоянно действующий водоносный горизонт (ВГ I) приурочен к песчаным отложениям четвертичного и верхнеолигоценного возраста тобольской ($Q_{II\text{тб}}$) и лагернотомской

($P_{3\text{т}}$) свит. Их общая мощность достигает 50 м.

Второй водоносный горизонт (ВГ II) представлен песчано-алевритовыми отложениями среднего олигоцена новомихайловской свиты ($P_{3\text{нм}}$), мощность которых достигает 40–50 м. Пески обладают высокой степенью глинистости, содержат напорные воды и могут проявлять способность к плавунности.

Третий водоносный горизонт (ВГ III) сложен песками верхнеэоцен-нижнеолигоценного возраста юрковской свиты ($P_{2-3\text{юр}}$). Мощность водовмещающих пород превышает 50 м. Они характеризуются максимальной степенью обводненности и обладают высоким напором над кровлей, обеспечивая самоизлив в долинах рек.

Воды третьего водоносного горизонта активно используются большинством водозаборов хозяйственно-питьевого назначения, в том числе с. Бакчар и других населенных пунктов. Количество воды и основные параметры эксплуатационного водоносного горизонта оценены для водозаборов с. Бакчар, Поротниково и утверждены в территориальной комиссии по запасам полезных ископаемых.

Менее изученным является водоносный комплекс отложений верхнего мела. Он представлен двумя горизонтами: в кровле и подошве продуктивной толщи.

Четвертый водоносный горизонт (ВГ IV), приуроченный к отложениям ганькинской свиты ($K_{2\text{гн}}$), образован обводненными песками мощностью до 25–30 м и обладает большим гидростатическим напором. Он подстилается непосредственно железорудной толщей, обладающей пониженными фильтрационными параметрами. Воды ганькинской свиты пресные.

В основании гидрогеологического разреза, под рудной толщей залегает пятый водоносный горизонт (ВГ V),

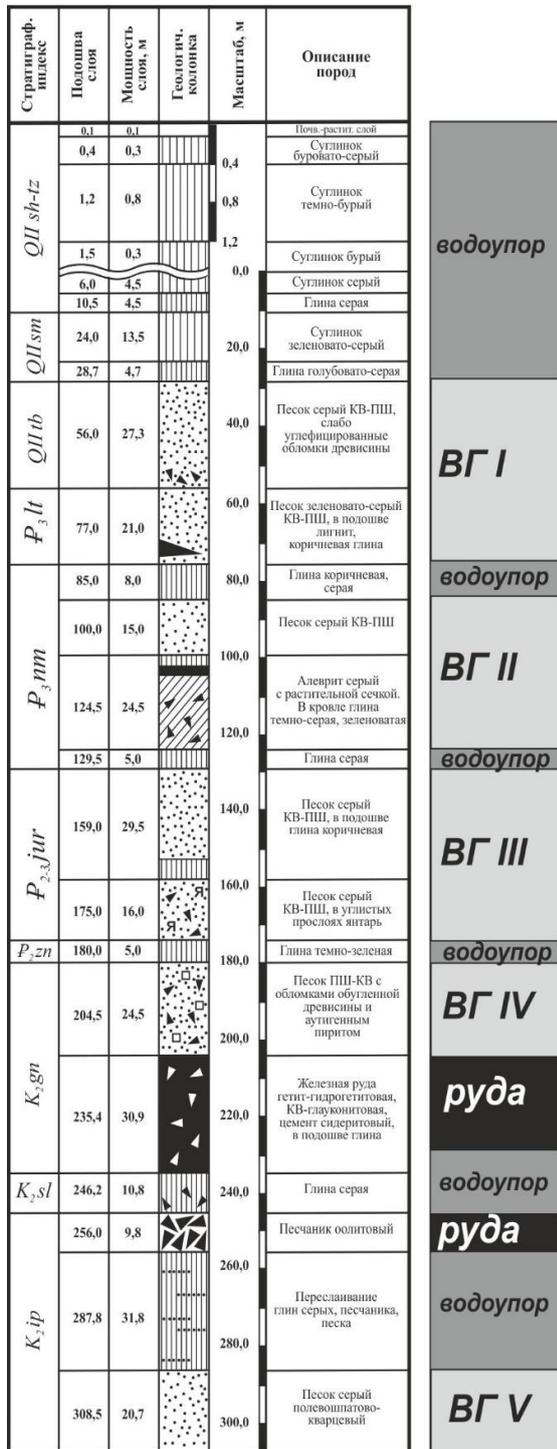


Рис. 2. Усредненный геологический разрез района Бакхарского железорудного месторождения (по Н.А. Ермашовой) с условной нумерацией водоносных горизонтов (ВГ I – ВГ V)
Fig. 2. Averaged geological section of the Bakchar iron ore deposit (according to N.A. Ermashova) with conditional numbering of aquifers (ВГ I – ВГ V)

приуроченный к отложениям песков нижней части ипатовской свиты ($K_2 ip$). Мощность водонасыщенных пород составляет 20 м. Подземные воды этой части разреза обладают высоким напором и повышенной минерализацией, позволяющей отнести их к минеральным лечебно-столовым.

Описанное строение гидрогеологического разреза позволяет предположить, что при отработке рудной залежи открытым способом в формировании водопритоков будут принимать участие все перечисленные водоносные горизонты. Четыре водонасыщенные толщи верхней части гидрогеологического разреза должны быть сдrenированы полностью при производстве вскрышных работ и дальнейшей эксплуатации карьера, что обеспечит основной водоприток на забой карьера за счет бокового притока. Водонасыщенные породы подрудной толщи могут повышать суммарный водоприток за счет формирования процессов перетекания через гидравлические окна в водоупорных породах верхней части ипатовской свиты (см. рис. 2).

Ожидаемые водопритоки в существенной степени будут зависеть от геометрических размеров проектируемой горной выработки.

В соответствии с описанными особенностями гидрогеологических условий схема формирования водопритоков представляет собой сложную гидродинамическую систему, основные элементы которой показаны на рис. 3.

Для расчета величины ожидаемых водопритоков при открытом способе отработки выполнена схематизация гидрогеологических условий. Выделено четыре неограниченных в плане напорных водоносных горизонта в границах надрудной части гидрогеологического разреза и один напорный горизонт в подрудной толще. Для выполнения геофильтрационных расчетов введена

условная нумерация водоносных горизонтов: I, II, III, IV и V (см. рис. 3). Величины расчетных мощностей водоносных горизонтов определены по сводной гидрогеологической колонке. Фильтрацион-

ные параметры скорректированы в соответствии с величинами коэффициентов водопроводимости, полученными при опробовании эксплуатационных гидрогеологических скважин (табл. 1).

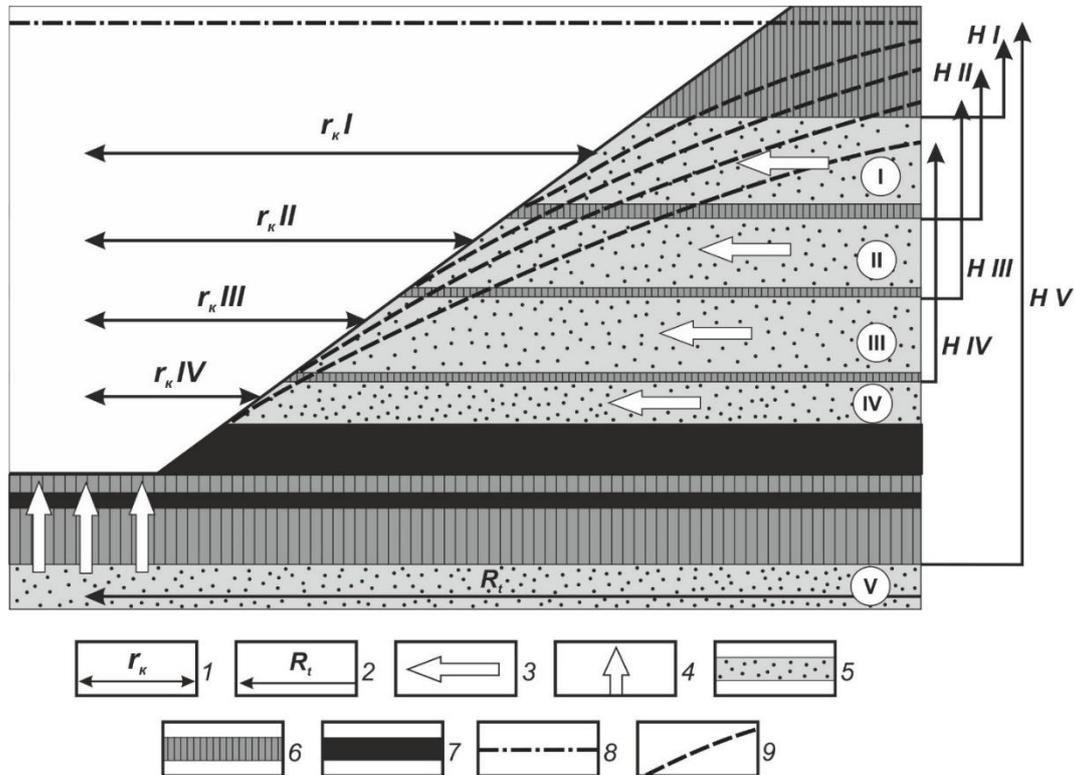


Рис. 3. Схема формирования ожидаемых водопритоков:

1 – приведенный радиус «большого колодца»; 2 – условный радиус влияния; 3 – направление бокового притока; 4 – направление вертикального фильтрационного потока за счет перетекания снизу; 5 – водоносные горизонты; 6 – водоупорные породы; 7 – рудные толщи; 8 – статический уровень подземных вод; 9 – динамический уровень подземных вод
 H – пьезометрическая высота; I-V условный номер водоносного горизонта

Fig. 3. Diagram of expected water inflow formation:

1 – equivalent radius of the "big well"; 2 – conditional radius of influence; 3 – direction of the lateral inflow; 4 – direction of the vertical filtering flow due to overflow from the bottom; 5 – aquifers; 6 – waterproof rocks; 7 – ore strata; 8 – static level of groundwaters; 9 – dynamic level of groundwaters
 H – piezometric height; I-V conditional number of an aquifer

Таблица 1

Расчетные фильтрационные параметры водоносных горизонтов

Table 1

Estimated filtration parameters of aquifers

Водоносный горизонт	Мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут.	Коэффициент водопроводимости, м ² /сут.	Коэффициент пьезопроводности, м ² /сут.
I	50	3	150	10 ⁶
II	50	5	250	10 ⁶
III	50	10	500	10 ⁶
IV	25	3	75	10 ⁶
V	20	3	60	10 ⁶

Прогнозную оценку водопритоков при открытом способе обработки месторождения целесообразно рассматривать на основе отдельной количественной оценки вклада каждого водоносного горизонта в суммарный проектный водоотлив. Определение расходов водоносных горизонтов выполнено с использованием аналитических методов. На этапе схематизации гидрогеологических условий принято формирование нестационарного фильтрационного потока под воздействием искусственного водоотлива для условий напорных неограниченных в плане водоносных горизонтов.

В целях внесения определенности в начальные условия решения геофильтрационной задачи принято, что обработка рудного тела проводится только в пределах верхней продуктивной толщи. Для определения размеров открытой горной выработки на уровне каждого водоносного горизонта угол откосов принят постоянным и равным 30° без обоснования устойчивости.

Расчетной схемой предусматривается вскрытие продуктивной толщи до глубины 235 м от поверхности с организацией водоотлива на забое карьера. Все четыре водоносных горизонта надрудной толщи разгружаются на откосы карьера. При дренировании водонасыщенных пород естественные напоры снижаются до высоты высачивания (см. рис. 3). Расчеты показывают, что она не превышает 2 м. Для каждого водоносного горизонта эта величина контролируется отметкой его подошвы за исключением целика под дном карьера. Формирующийся при этом расход зависит от размеров периметра вскрытой части водоносного горизонта, величины гидравлического уклона (который уменьшается во время эксплуатации карьера при стабильных его размерах) и фильтрационных параметров водовмещающих пород.

При наличии высоконапорных подземных вод в подрудной толще можно

ожидать поступления дополнительных водопритоков за счет вертикального перетекания снизу. Эта часть суммарного водопритока зависит от величины напора, площади забоя, мощности и фильтрационных параметров разделяющего слоя.

Оценка водопритоков выполнена на основе комплексирования аналитических расчетов. Боковой водоприток оценивался при нестационарном гидродинамическом режиме по методу «большого колодца» для четырех изолированных напорных водоносных горизонтов. Водоприток снизу оценивался по схеме вертикальной фильтрации (рис. 4), учитывающей слоистое строение полупроницаемого отдельного слоя.

Восходящий фильтрационный поток формируется под влиянием величины действующего напора (ΔH), образующегося за счет разности напоров на нижней и верхней границах отдельной слоистой толщи, параметры которой характеризуются частными значениями коэффициентов фильтрации (k_{1-3}) и мощностей разделяющих слоев (h_{1-3}).

Оценка вертикального водопритока потока выполнена на основе фундаментальных зависимостей для фильтрационного потока:

$$Q = F \cdot V,$$

где Q – расход фильтрационного потока, $\text{м}^3/\text{сут.}$; F – площадь поперечного сечения потока (соответствует площади забоя карьера), м ; V – скорость фильтрационного потока, $\text{м}/\text{сут.}$

В свою очередь скорость вертикальной фильтрации оценивается с учетом неоднородности разделяющих горизонтов:

$$V = k_{cp} \cdot \frac{H_{max} - H_{min}}{L},$$

где k_{cp} – среднее значение коэффициента фильтрации при движении фильтрационного потока перпендикулярно плоскостям напластования, $\text{м}/\text{сут.}$; H_{max} , H_{min} – значения напора на границах

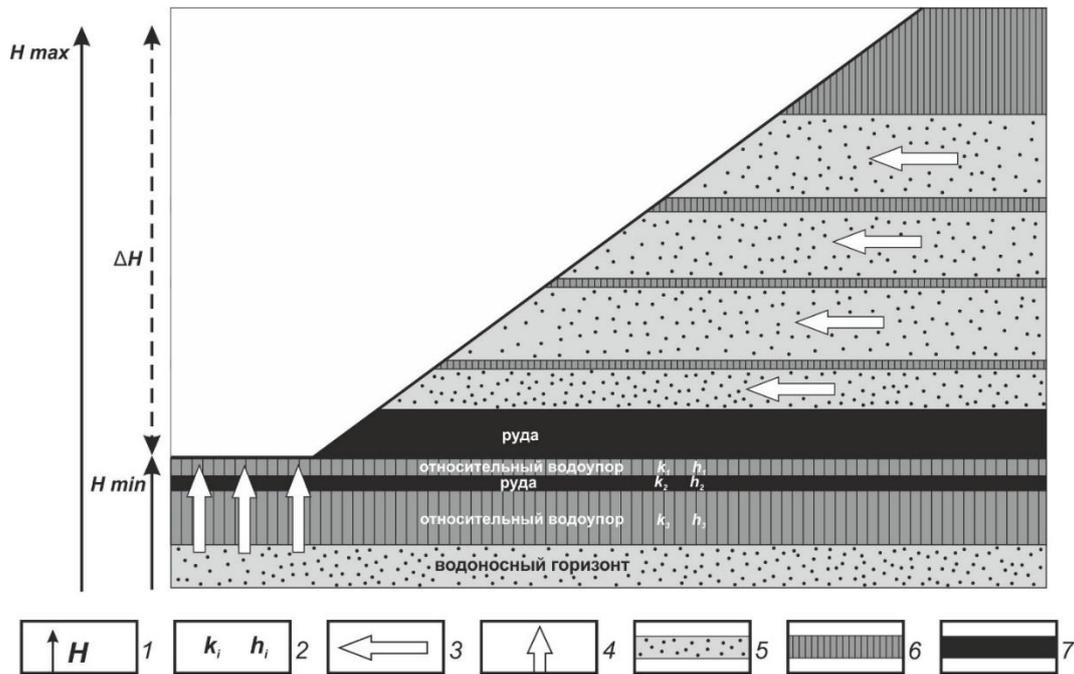


Рис. 4. Расчетная схема вертикальной фильтрации:

1 – напор (максимальный, минимальный, действующий); 2 – параметры и номер относительного водоупора (k_i – коэффициент фильтрации, м/сут.; h_i – мощность, м); 3 – направление бокового притока; 4 – направление вертикального фильтрационного потока за счет перетекания снизу; 5 – водоносные горизонты; 6 – водоупорные породы; 7 – рудные толщи

Fig. 4. Calculation model of vertical filtering:

1 – head (maximum, minimum, effective); 2 – parameters and number of a relative confining layer (k_i – filtration coefficient, m/day; h_i – thickness, m); 3 – direction of the lateral inflow; 4 – direction of the vertical filtering flow due to overflow from the bottom; 5 – aquifers; 6 – waterproof rocks; 7 – ore strata

полупроницаемой толщи, м; L – длина пути вертикальной фильтрации, м.

Неоднородное строение разреза при определении скорости фильтрационного потока учитывается расчетом среднего значения коэффициента фильтрации. В случае движения подземных вод перпендикулярно плоскостям напластования используется формула

$$k_{cp} = \frac{\sum h_i}{\sum (h_i / k_i)},$$

где k_{cp} – средняя по разрезу слоистой мощности величина коэффициента фильтрации, м/сут.; h_i – мощность i -го слоя полупроницаемых пород, м; k_i – коэффициент фильтрации i -го слоя полупроницаемых пород, м/сут. (символ суммы означает суммирование по всем слоям неоднородного разреза).

Величина восходящего фильтрационного потока находится в прямой зави-

симости от площади забоя карьера и увеличивается в процессе наращивания объемов горных работ.

Для расчета бокового притока использован метод «большого колодца», в основе которого лежит основная зависимость определения водопритока к совершенной гидрогеологической скважине в условиях нестационарного режима фильтрации:

$$Q = \frac{2\pi kmS}{\ln \frac{R_t}{r_k}};$$

$$R_t = 1,5\sqrt{at_i};$$

$$r_k = \frac{\sqrt{F}}{\pi},$$

где k – коэффициент фильтрации водовмещающих пород, м/сут.; m – мощность водоносного горизонта, м; S – понижение уровня при водоотливе, м; R_t – текущее значение условного радиуса

влияния, m ; a – коэффициент пьезопроводности, $m^2/сут.$; t_i – продолжительность i -го расчетного периода, сут.; r_k – приведенный радиус «большого колодца», m ; F – площадь забоя карьера.

Расчеты по указанной формуле выполнялись для каждого из водоносных горизонтов отдельно, а результаты вычислений складывались. Это дает возможность не только определить суммарный водоприток, но и оценить в первом приближении его структуру на уровне количественного соотношения частных расходов.

В условиях существенной неоднозначности исходных условий расчеты выполнены в многовариантной постановке в диапазоне изменения значений фильтрационных параметров, размеров карьера и времени его эксплуатации.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные результаты выполненных геофильтрационных расчетов показаны в сводной форме (табл. 2). Суммарная величина ожидаемых водопритоков

изменяется в процессе эксплуатации карьера, в значительной мере зависит от размеров забоя и составляет для принятой расчетной схемы величину, близкую в среднем к $200000 m^3/сут.$ В начальный период эксплуатации прогнозная величина водопритоков при стабильных размерах карьера достигает максимума за счет сработки естественных запасов, а за время длительной эксплуатации снижается при одновременном увеличении размеров депрессионной воронки и уменьшении величин гидравлических уклонов. Суммарная величина водопритоков растет с увеличением площади забоя карьера. Вклад отдельных водоносных горизонтов, показанный в табл. 3, можно оценить как стабильный во времени, не испытывающий заметных колебаний в процессе эксплуатации. Полное представление о структуре формирования водопритоков за счет дренирования отдельных водоносных горизонтов дают средние значения их доли в суммарном расходе.

Таблица 2

Изменение прогнозных водопритоков во времени

Table 2

Change in predicted water inflows over time

Вариант расчета	Длина стороны забоя карьера квадратного сечения, м	Суммарный водоприток при различных сроках эксплуатации карьера, $m^3/сут.$			
		300 сут.	1000 сут.	3000 сут.	10000 сут.
1	100	191857	169151	152608	137806
2	200	198353	174248	156789	141245
3	300	204509	179076	160754	144515
4	400	210412	183711	164569	147674
5	500	216127	188205	168280	150760
6	600	221702	192600	171922	153805
7	700	227173	196927	175522	156831
8	800	232570	201209	179100	159856
9	900	237915	205468	182675	162895
10	1000	243228	209717	186258	165959
11	1100	248525	213972	189863	169059
12	1200	253818	218243	193498	172201
13	1300	259119	222539	197172	175394
14	1400	264438	226868	200890	178643
15	1500	269782	231238	204661	181953

Таблица 3

Доля расходов отдельных водоносных горизонтов в суммарном водопритоке, %

Table 3

Flow percentage of individual aquifers in the total water inflow, %

Вариант расчета	Длина стороны забоя карьера квадратного сечения, м	Водоносные горизонты				
		I	II	III	IV	V
1	100	8,5	47,7	32,4	11,3	0,03
2	200	8,5	47,7	32,4	11,3	0,12
3	300	8,5	47,6	32,4	11,3	0,25
4	400	8,5	47,5	32,3	11,3	0,43
5	500	8,5	47,4	32,2	11,2	0,66
6	600	8,4	47,3	32,1	11,2	0,93
7	700	8,4	47,1	32,0	11,2	1,23
8	800	8,4	47,0	31,9	11,1	1,57
9	900	8,3	46,8	31,8	11,1	1,95
10	1000	8,3	46,6	31,7	11,0	2,35
11	1100	8,3	46,4	31,5	11,0	2,78
12	1200	8,2	46,2	31,4	10,9	3,24
13	1300	8,2	46,0	31,2	10,9	3,73
14	1400	8,2	45,7	31,1	10,8	4,23
15	1500	8,1	45,5	30,9	10,8	4,76
Среднее		8,4	46,8	31,8	11,1	1,9

Полученную прогнозную оценку водопритоков следует рассматривать как предварительную, но учитывающую все известные к настоящему времени количественные параметры, характеризующие гидрогеологический разрез в районе предполагаемой первоочередной отработки месторождения.

Выводы

Анализ гидрогеологических условий Бакчарского железорудного месторождения показал, что в целом геологический разрез представляет собой водонасыщенную гидродинамическую систему, состоящую из отдельных коллекторов с разными фильтрационными свойствами.

По результатам исследований наиболее детально изучен водоносный горизонт отложений новомихайловской и юрковской свит в связи с работами по оценке запасов подземных вод для водоснабжения с. Бакчар и Поротниково. Водоносные горизонты отложений тобольской и лагернотомской свит (первый от

поверхности водоносный горизонт); ганькинской свиты (третий от поверхности водоносный горизонт, слагающий непосредственно рудоносную толщу) и отложений ипатовской свиты (четвертый от поверхности водоносный горизонт, подрудная толща) опытными работами практически не изучены.

По сложности гидрогеологических условий участок недр Бакчарского железорудного месторождения предварительно можно отнести к первой группе сложности с простыми геолого-гидрогеологическими условиями по критериям классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод. Особенности геологического строения и гидрогеологических условий позволяют предположить, что при отработке рудной залежи открытым способом в формировании водопритоков будут принимать участие все перечисленные водоносные горизонты. Три водонасыщенные толщи верхней части гидрогеологического разреза должны

быть сдренированы полностью при производстве вскрышных работ и дальнейшей эксплуатации карьера, что обеспечит основной водоприток на забой открытой горной выработки. Водонасыщенные породы подрудной толщи могут повышать суммарный водоприток за счет формирования процессов перетекания через водоупорные породы верхней части ипатовской свиты. Ожидаемые водопритоки в существенной степени будут зависеть от геометрических размеров проектируемой горной выработки.

Необходимо отметить, что на современном этапе изучения особенностей геологического строения и гидрогеологических условий более точная оценка водопритоков невозможна. Это определяется не только слабой изученностью фильтрационных параметров отдельных водоносных горизонтов (коэффициентов фильтрации, водопроницаемости, пьезопроницаемости, водоотдачи), но и отсутствием надежных оценок их пространственной изменчивости. Значительные осложнения возникают с неопределенно-

стью плана горных работ. Это заметно снижает достоверность прогнозных геофильтрационных расчетов, но дает представление о весьма внушительных масштабах необходимого водоотлива, которые заставляют задуматься о сравнительной оценке альтернативных способов добычи рудного материала, например с использованием скважиной гидродобычи.

Наиболее рациональный подход к изучению гидрогеологического разреза предполагает сопровождение гидрогеологических исследований одновременным моделированием гидрогеологических условий с применением численных методов в режиме постояннодействующей модели месторождения в режиме разведочного моделирования. Такой методический прием позволяет не только оперативно получать откорректированные по результатам разведочных работ уточненные прогнозные оценки, но и оптимизировать объемы необходимых разведочных работ.

Библиографический список

1. Западно-Сибирский железорудный бассейн / под ред. Л.И. Шапковской. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. 448 с.

2. Николаева И.В. Бакcharское месторождение оолитовых железных руд. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1967. 129 с.

3. Мазуров А.К., Боярко Г.Ю., Емешев В.Г., Комаров А.В. Перспективы освоения Бакcharского железорудного месторождения, Томская область // Руды и металлы. 2006. № 2. С. 64–70.

4. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional variation of glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene sedimentary iron-ore deposits in South-eastern Western Siberia // *Sedimentary Geology*. 2017. Vol. 355. P. 20–30.

5. Asochakova E. Geochemistry of sedimentary iron ores Bakchar deposit, Western Siberia // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th*. 2015. С. 181–188.

6. Asochakova E.M. Features structure of iron-bearing strata's of the Bakchar deposit, Western Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 9, Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes. Series: 9th All Russian Petrographic Conference with International Participation: Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes. 2018. P. 012002.

7. Dutova E., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V., Vologdina I., Pokrovsky D. Hydrogenous mineral neoformations in Tomsk water intake facility from under-

ground sources // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. P. 012017.

8. Karmalov A.I., Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Pokrovskiy V.D., Kuzevanov K.K. Hydrogeochemical characteristics of water intakes from groundwater sources in Seversk // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. P. 012032.

9. Ломакин Е.М., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1988. 228 с.

10. Аузина Л.И. Гидродинамическая роль граничных условий при расчете обводненности Сюкеевского месторождения гипса (Республика Татарстан) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2012. № 1 (40). С. 78–86.

11. Хархордин И.Л., Гурин А.Н., Назима В.В., Иванов И.Н. Организация системы гидрогеомеханического мониторинга на месторождении им. М.В. Ломоносова // Горный журнал. 2012. № 7. С. 40–43.

12. Purgina D., Strokova L., Kuzevanov K. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. P. 012046.

13. Аузина Л.И. Особенности обводненности золоторудных месторожде-

ний Витимо-Патомского нагорья // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 1 (58). С. 127–136.

14. Гридасов А.Г., Кузеванов К.И. Схематизация гидрогеологических условий на участках добычи угольного метана в Кузбассе для обоснования прогнозных гидродинамических расчетов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 3 (121). С. 12–22.

15. Дунюшин А.А., Синдаловский Л.Н., Никуленков А.М., Румынин В.Г. О влиянии масштаба опытно-фильтрационных работ на расчетные значения фильтрационных параметров (на примере гидрогеологических исследований на месторождении алмазов им. М.В. Ломоносова) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 5. С. 67–80.

16. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / отв. ред. Е.В. Пиннекер. М.: Недра, 1991. 262 с.

17. Ермашова Н.А. Гидрогеологическая типизация Бакcharского железорудного месторождения и прогноз условий его освоения // Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири: материалы Межрегион. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. С. 125–128.

References

1. Shapkovskaja L.I. *Zapadno-Sibirskii zhelezorudnyi bassein* [West Siberian iron ore basin]. Novosibirsk: Siberian branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1964, 448 p. (In Russian).

2. Nikolaeva I.V. *Bakcharskoe mestorozhdenie oolitovykh zheleznykh rud* [Bakchar Deposit of oolitic iron ores]. Novo-

sibirsk: Siberian branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1967, 129 p. (In Russian).

3. Mazurov A.K., Boyarko G.Yu., Emeshev V.G., Komarov A.V. Development prospects of the Bakchar iron ore deposit, Tomsk region. *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2006, no. 2, pp. 64–70. (In Russian).

4. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional variation of glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene sedimentary iron-ore deposits in South-eastern Western Siberia. *Sedimentary Geology*, 2017, vol. 355, pp. 20–30.

5. Asochakova E. Geochemistry of sedimentary iron ores Bakchar deposit, Western Siberia. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th, 2015, pp. 181–188.

6. Asochakova E.M. Features structure of iron-bearing strata's of the Bakchar deposit, Western Siberia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 9, Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes. Series: 9th All Russian Petrographic Conference with International Participation: Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes, 2018, p. 012002.

7. Dutova E., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V., Vologdina I., Pokrovsky D. Hydrogenous mineral neof ormations in Tomsk water intake facility from underground sources. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2016, p. 012017.

8. Karmalov A.I., Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Pokrovskiy V.D., Kuzevanov K.K. Hydrogeochemical characteristics of water intakes from groundwater sources in Seversk. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2016, p. 012032.

9. Lomakin E.M., Mironenko V.A., Shestakov V.M. *Chislennoe modelirovanie geofil'tratsii* [Numerical simulation of geofiltration]. Moscow: Nedra Publ., 1988, 228 p. (In Russian).

10. Auzina L.I. Hydrodynamic role of boundary conditions when calculating water content of Syukeevskoe gypsum deposit (Tatarstan Republic). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of

the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. *Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*], 2012, no. 1 (40), pp. 78–86. (In Russian).

11. Kharkhordin I.L., Gurin A.N., Nazima V.V., Ivanov I.N. Organization of a hydromechanical monitoring system at Lomonosov diamond deposit. *Gornyi zhurnal* [Journal of Mining], 2012, no. 7, pp. 40–43. (In Russian).

12. Purgina D., Strokovaya L., Kuzevanov K. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2016, p. 012046.

13. Auzina L.I. Water encroachment features of Vitim-Patom highland gold deposits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. *Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*], 2017, vol. 40, no. 1 (58), pp. 127–136. (In Russian).

14. Gridasov A.G., Kuzevanov K.I. Generalisation of hydrogeological conditions at coalbed methane fields in the Kuznetsk coal basin for predictional hydrodynamic calculations. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University], 2017, no. 3 (121), pp. 12–22. (In Russian).

15. Dunyushin A.A., Sindalovskii L.N., Nikulenkov A.M., Rumynin V.G. Scale dependent phenomena in flow test and monitoring data analysis (with application to hydrogeological investigations at the M.V. Lomonosov diamond deposit, Archangelsk Province, RF). *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Environmental Geoscience], 2017, no. 5, pp. 67–80. (In Russian).

16. Pinneker E.V. *Resursy presnykh i malomineralizovannykh podzemnykh vod yuzhnoi chasti Zapadno-Sibirskogo artezi-anskogo basseina* [Resources of fresh and low-mineralized groundwater in the southern part of the West Siberian artesian basin]. Moscow: Nedra Publ., 1991, 262 p. (In Russian).

17. Ermashova N.A. *Gidrogeologicheskaya tipizatsiya Bakcharskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya i prognoz uslovii ego osvoeniya* [Hydrogeological typ-

ing of the Bakchar iron ore deposit and forecast of its development conditions]. *Materialy mezhhregion. nauch.-prakt. konf. "Problemy i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy i predpriyatii TEK Sibiri"* [Materials of the inter-regional scientific and practical conference "Problems and development prospects of mineral resources base and enterprises of the fuel and energy complex of Siberia"]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2005, pp. 125–128. (In Russian).

Критерии авторства

Кузеванов К.И., Кузеванов К.К., Дутова Е.М., Покровский В.Д. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kuzevanov K.I., Kuzevanov K.K., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.462

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-37-49>

СОСТАВ РАСТВОРОВ, ФОРМИРОВАВШИХ МОЛИБДЕНОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ ПЕРВОМАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ДЖИДИНСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ, ЮГО-ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© Л.Б. Дамдинова^а, Б.Б. Дамдинов^б

^{а,б}Геологический институт СО РАН,
670047, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

РЕЗЮМЕ: Целью исследования является определение состава рудообразующих растворов и физико-химических условий формирования молибденового оруденения Первомайского штокверкового месторождения в пределах Джидинского рудного поля (Юго-Западное Забайкалье). На основе комплекса минералогическо-петрографических и геохимических исследований установлен вещественный состав рудных кварц-молибденовых жил и околопрожилковых зон. Методами крио- и термометрии, а также с помощью современных инструментальных микронзондовых методов исследования вещества (КР-спектроскопия и LA-ICP-MS) изучены флюидные включения в кварце богатых и бедных кварц-молибденитовых прожилков, определены состав газовой фазы и концентрации металлов в растворах, ответственных за формирование кварц-молибденитовых прожилков. Проведенные исследования показали, что кварц-молибденитовые жилы Первомайского месторождения формировались в интервале температур 314–186 °С при участии гомогенных флюидов с периодами гетерогенизации раствора с общей концентрацией солей 6,3–11,7 масс. % экв. NaCl. В составе газовой фазы установлены CO₂, CH₄ и N₂. Методом LA-ICP-MS были определены концентрации широкого спектра элементов: Li, Be, B, F, Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, La, Ce, Ta, W, Au, Pb, Th, U. Содержания главного рудного элемента Mo в богатых кварц-молибденитовых прожилках достигают 559 г/т при среднем значении 182 г/т, тогда как в бедных они не превышают 85 г/т при среднем значении 13 г/т. Более богатые прожилки были сформированы околонейтральными растворами с большим содержанием Mo, S и F, тогда как из растворов повышенной щелочности отлагаются относительно бедные прожилки, что позволяет считать pH растворов одним из факторов рудоносности.

Ключевые слова: Первомайское месторождение, молибден, флюидные включения, рудообразующие растворы, LA-ICP-MS, металлоносность

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-030002р_а.

Информация о статье: Дата поступления 1 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 3 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. Состав растворов, формировавших молибденовое оруденение Первомайского месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2018;41(4):37–49. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-37-49.

^аДамдинова Людмила Борисовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории петрологии, e-mail: ludamdinova@mail.ru
Lyudmila B. Damdinova, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Petrology Laboratory, e-mail: ludamdinova@mail.ru

^бДамдинов Булат Батуевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудообразующих процессов, e-mail: damdinov@mail.ru
Bulat B. Damdinov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher of the Laboratory of Geochemistry and Ore Formation Processes, e-mail: damdinov@mail.ru

**COMPOSITION OF SOLUTIONS FORMING MOLYBDENUM
MINERALIZATION OF PERVOMAISKOE DEPOSIT
(DZHIDA ORE FIELD, SOUTH-WESTERN TRANSBAIKALIA)**

© Lyudmila B. Damdinova, Bulat B. Damdinov

^{a,b}Geological Institute SB RAS,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of this study is determination of the composition of ore-forming solutions and physico-chemical formation conditions of molybdenum mineralization in the Pervomaiskoe stockwork deposit within the Dzhida ore field (South-Western Transbaikalia). A set of mineralogical, petrographic and geochemical studies allowed to identify the material composition of ore quartz-molybdenum veins and near-veinlet zones. The methods of cryometry and thermometry, as well as modern instrumental microprobe methods of matter study (Raman-spectroscopy and LA-ICP-MS) were used to examine fluid inclusions in quartz of bonanza and lean quartz-molybdenite veinlets. The composition of a gas phase and metal concentrations in the solutions forming quartz-molybdenite veinlets were determined. Conducted studies show that the quartz-molybdenite veins of the Pervomaiskoe deposit were formed in the temperature range of 314–186 °C under the participation of homogeneous fluids with solution heterogenization periods. Total salt concentrations are 6.3–11.7 wt.% eq. NaCl. The gas phase contains CO₂, CH₄ and N₂. Using LA-ICP-MS method the concentrations of a wide range of elements including Li, Be, B, F, Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, La, Ce, Ta, W, Au, Pb, Th, U were determined. The content of the main ore element Mo in bonanza quartz-molybdenite veinlets reaches up to 559 g/t, whereas the average value is 182 g/t. The content of Mo in lean veinlets does not exceed 85 g/t, whereas the average value is 13 g/t. Richer veinlets were formed by near-neutral solutions with a high content of Mo, S and F, while relatively poor veinlets were precipitated from high alkaline solutions. All these enable us to consider the pH of solutions as one of the factors of ore content.

Keywords: Pervomaiskoe deposit, molybdenum, fluid inclusions, ore-forming solutions, LA-ICP-MS, metal content

Acknowledgement: The study has been performed with the funding by the Russian Foundation for Basic Research grant No. 18-45-030002p_a.

Information about the article: Received November 1, 2018; accepted for publication December 3, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Damdinova L.B., Damdinov B.B. Composition of solutions forming molybdenum mineralization of Pervomaiskoe deposit (Dzhida ore field, South-Western Transbaikalia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2018;41(4):37–49 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-37-49.

Введение

Информация об условиях и причинах формирования штокверковых (грейзеновых) W-Mo(Be) месторождений в настоящее время является неполной и отрывочной и требует дополнительных исследований для уточнения. В особенности это касается данных по флюидному режиму, газовой-солевому составу, P-T-X-параметрам, а также эволюции и металлоносности растворов, продуцирующих жильно-штокверковое W-Mo(Be) оруденение.

На территории Юго-Западного Забайкалья известны месторождения Джидинского рудного поля, характеризующегося высокой концентрацией оруденения на небольшой площади и включающего крупные промышленные месторождения: Первомайское, Инкурское и Холтосонское. Это уникальные геологические объекты и крупнейшие в регионе (и в стране) источники W и Mo. В качестве примесных компонентов в рудах присутствует также и ряд других полезных компонентов – Be, Cd, Pb, Zn, Au и т. д.

Объектом исследования является Первомайское штокверковое Мо месторождение, относящееся к типу редкометалльных грейзеновых месторождений. Предшественниками установлено, что все три месторождения Джидинского рудного поля генетически связаны с единой гранитоидной интрузией [1, 2]. Формирование штокверковой Мо-W минерализации происходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных во времени периодами интрузивного магматизма. Сначала сформировался Мо штокверк, позже прожилки с Мо-Ве минерализацией, затем штокверк гюбнеритсодержащих прожилков. Поскольку кварц-молибденитовые прожилки являются самыми ранними среди рудных прожилков Джидинского Мо-W(Be) рудного поля, исследования P-T-X-параметров их формирования и металлоносности позволят реконструировать ранние этапы эволюции Джидинской рудно-магматической системы.

Методы исследования

Для решения минералогических и петрографических задач использовались методы оптической микроскопии на поляризационном микроскопе OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV. Химический состав минералов определен Е.В. Ходыревой и кандидатом геолого-минералогических наук С.В. Канакиным в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) методом рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy 350.

Флюидные включения (ФВ) в минералах исследовались методами термометрии, криометрии, волюмометрии и КР-спектроскопии. Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз и гомогенизации сжиженных газов использовалась микротермокамера

THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до +600 °С. Стандартная аппаратная ошибка измерений составляет $\pm 0,1$ в отрицательной и ± 5 °С в положительной области температур. Приблизительную оценку содержания солей во включениях находили по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему (NaCl-H₂O) через эквивалент NaCl [3]. Преобладающая соль в водном растворе включений определялась по температуре эвтектики, характеризующей водно-солевую систему [4].

Состав газовой фазы индивидуальных ФВ определен методом КР-спектроскопии в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) на одноканальном КР-спектрометре LabRamHR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II и конфокальным микроскопом Olympus BX-41. В качестве возбуждающего использовано излучение Ar лазера CVI Melles Girot с длиной волны 514 нм и выходной мощностью 50–30 мВт.

Вскрытие наиболее крупных ФВ и анализ металлоносности рудообразующих растворов проводились методом LA-ICP-MS на масс-спектрометре NexION 300D с платформой лазерной абляции NWR-213 в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск, аналитик – кандидат геолого-минералогических наук Н.В. Брянский). В качестве внешнего стандарта использовался стандартный образец NIST-610. Расчет содержаний элементов в рудообразующих растворах осуществлялся по методике, описанной в работе А.А. Боровикова и др. [5].

Краткая геологическая характеристика месторождения

Строение, минералого-геохимические особенности, а также последовательность формирования и происхождения оруденения Джидинского рудного

поля изучались многими исследователями [6–16 и др.]. Особенностью Джидинского рудного поля, отмечаемой всеми исследователями, является то, что гидротермальное рудообразование имело пульсационный характер и неоднократно перемежалось с магматическими инъекциями в основном гранитного состава, а профиль рудной минерализации изменялся в последовательности $Mo \rightarrow Mo+Ve \rightarrow Ve+W \rightarrow W+Pb, Zn$.

Кварц-молибденовый штокверк Первомайского месторождения, образованный сетью различно ориентированных кварц-молибденитовых жил и прожилков, охватывает апикальную часть одноименного массива гранит-порфиров (рис. 1) и прилегающие к нему биотит-

кварцевые роговики. Массив образует лакколитообразное тело с апофизами, площадь его выхода на поверхность составляет $\sim 0,35 \text{ км}^2$. Согласно результатам Rb-Sr изохронного датирования, возраст формирования Первомайского гранитного штока соответствует $124,3 \pm 1,6$ млн лет [17].

Оруденение на месторождении представлено жилами и прожилками мощностью от первых сантиметров до 1–1,5 м и более. Особо богатым является прожилковое оруденение с мощностью прожилков до $\sim 5 \text{ см}$, участками сопровождающееся зонами вкрапленных молибденовых руд. Подавляющее большинство руд имеет содержание $Mo \sim 0,1–0,15$ масс. %.

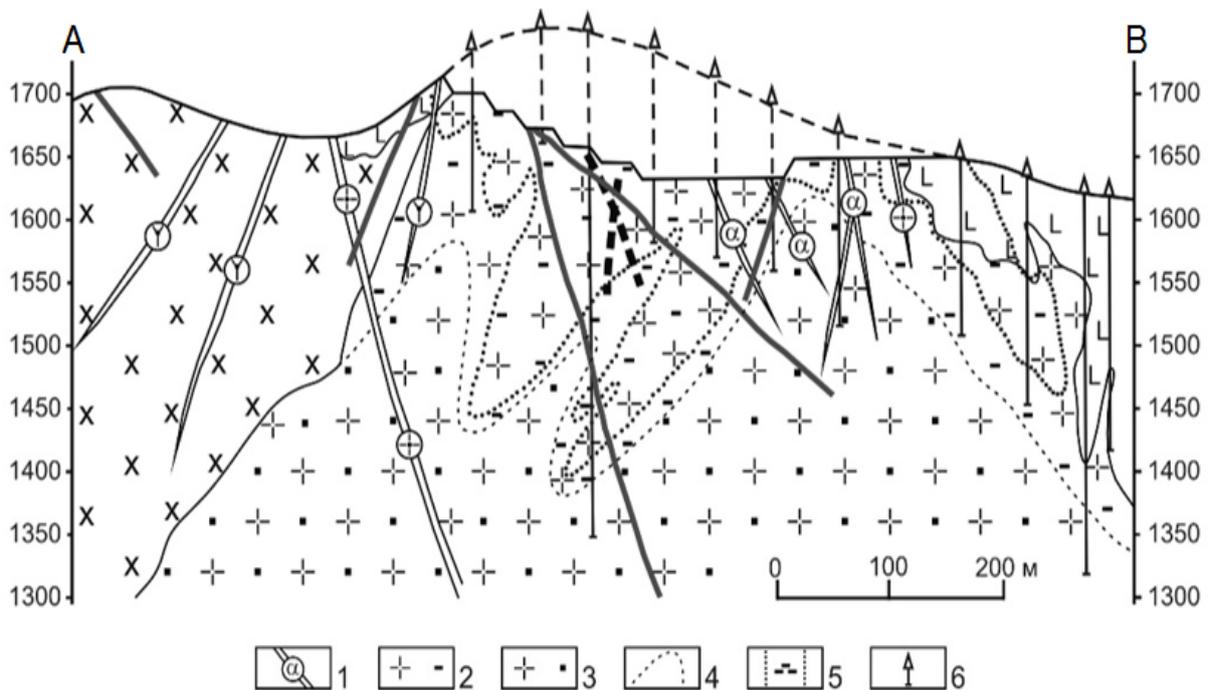


Рис. 1. Геологический разрез Первомайского молибденового (А–В) штокверкового месторождения (составлен с использованием материалов П.Ю. Ходановича [16]):
 1–4 – в пределах Первомайского молибденового месторождения: 1 – дайки аплитовидных гранитов, аплитов, 2 – биотитовые граниты альбитизированные, 3 – биотитовые граниты микроклинизированные и грейзенизированные, 4 – границы между метасоматическими изменениями гранитов; 5 – контуры штокверка; 6 – разведочные скважины

Fig. 1. Geological section of the Pervomaiskoe molybdenum (A–B) stockwork deposit (composed by P. Yu. Khodanovich's materials [16]):

1–4 – within the Pervomaiskoe molybdenum deposit: 1 – dikes of aplite granites, aplites, 2 – albitized biotite granites, 3 – microclinized and greisenized biotite granites, 4 – boundaries between metasomatic changes of granites; 5 – stockwork contours; 6 – exploration wells

Минеральный состав

Породы, вмещающие оруденение, представлены порфиroidными гранитами (рис. 2), которые имеют относительно выдержанный состав. Мелкозернистая основная масса пород сложена калиевым полевым шпатом, кварцем, плагиоклазом, а также биотитом и мусковитом, количество которых в разных шлифах варьирует от 5 до 10 %. Кроме того, отмечается редкая вкрапленность (1–2 %) пирита, флюорита и апатита (< 1 %). Порфиroidные вкрапленники, равномерно распределенные в основной массе, достигают в размерах 5 мм и представлены кварцем, калиевым полевым шпатом и реже плагиоклазом.

Авторами настоящей статьи было изучено два типа прожилков: обогащенные молибденит-кварцевые прожилки (первый тип) и бедные молибденом кварц-молибденитовые прожилки (второй тип). Молибденит-кварцевые прожилки обоих типов на 80–90 % сложены изометричными зернами кварца, участ-

ками отмечаются шестоватые зерна, растущие перпендикулярно стенкам прожилка. Это свидетельствует о том, что прожилки, вероятнее всего, формировались путем выполнения трещин. Мощность прожилков варьирует от 0,2 до 1,5 см, границы с вмещающими породами четкие, в большинстве случаев ровные. Молибденит образует скопления чешуек, иногда радиально-лучистые агрегаты, количество его – в среднем 5–10 %. Распределение молибденита неравномерное (см. рис. 2): в одних случаях он приурочен к центральной части, в других – к зальбандам прожилков или рассеян во всем объеме жильного кварца. Гораздо реже чешуйки молибденита выходят за пределы прожилка во вмещающие породы.

По данным минералого-петрографических исследований в составе прожилков кроме кварца были идентифицированы мусковит, калиевый полевой шпат, альбит и флюорит (табл. 1).

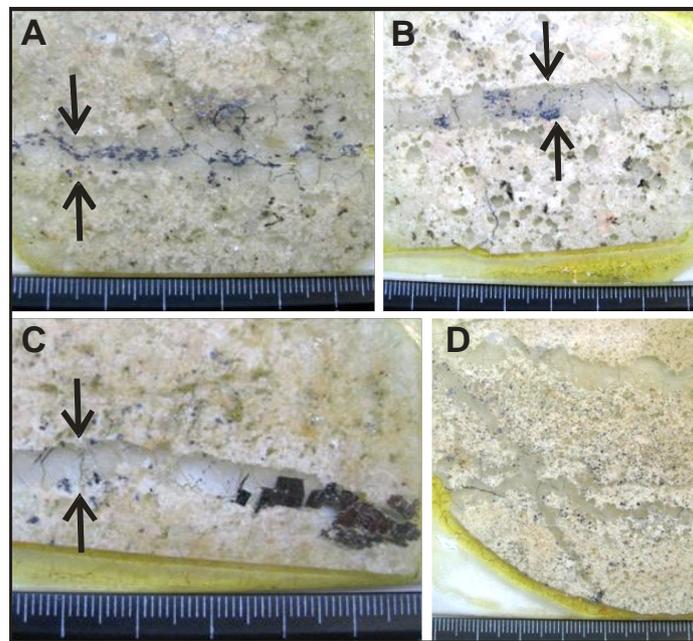


Рис. 2. Богатые молибденитом кварц-молибденитовые прожилки первого типа (A, B) и бедные молибденитом прожилки второго типа (C, D)

Стрелками показаны прожилки

Fig. 2. Molybdenite-rich quartz-molybdenite veinlets of type 1 (A, B) and molybdenite-poor veinlets of type 2 (C, D)

The arrows show veinlets

Таблица 1

Минеральный состав кварц-молибденитовых прожилков

Table 1

Mineral composition of quartz-molybdenite veinlets

Ассоциация		Минерал
Жильные минералы	Главные	Кварц
	Второстепенные	Мусковит
		Калиевый полевой шпат
		Альбит
		Флюорит
Рудные минералы	Главные	Молибденит MoS_2
	Второстепенные	Пирит FeS_2
		Галенит PbS , сфалерит ZnS
		Халькопирит CuFeS_2
		Берилл $\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
		Колумбит $(\text{Fe}, \text{Mn} \pm \text{W}, \text{Sc})(\text{Nb}, \text{Ta} \pm \text{Ti})_2\text{O}_6$
		Айкинит PbCuBiS_3
		Вульфенит $\text{Pb}(\text{MoO}_4)$
	Висмутин Bi_2S_3	
	Редкие	Сакураит $(\text{Cu}, \text{Zn}, \text{Fe})_3(\text{In}, \text{Sn})\text{S}_4$
	Зальцбургит $\text{Pb}_{1,6}\text{Cu}_{1,6}\text{Bi}_{6,4}\text{S}_{12}$	
Акцессорные минералы		Рутил TiO_2
		Монацит $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})[\text{PO}_4]$
		Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
		Циркон ZrSiO_4
Вторичные минералы		Англезит PbSO_4
		Гетит $\text{FeO}(\text{OH})$

Из рудных минералов количественно преобладают молибденит и пирит. Среди второстепенных и редких диагностировано большое количество минеральных видов: сульфиды (пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, висмутин), а также колумбит, вульфенит, берилл, редкие сульфосоли представлены айкинитом, сакураитом и зальцбургитом. Акцессорные минералы представлены редкими зернами рутила, монацита, апатита и циркона, вторичные – англезитом и гетитом.

На основе анализа минерального состава прожилков можно сделать вывод о том, что в составе рудообразующих растворов присутствовали такие элементы, как Si, Na, K, Al, Ca, Fe, F, S, Mo,

Pb, Zn, Cu, Ti, Be, Mn, Bi, Sc, Nb, Ta, Zr, PЗЭ, P, Cl, W.

Для выяснения масштабов и характера взаимодействия рудовмещающих гранитов с растворами, протекавшими по трещинам, образец гранита, содержащего прожилки, разрезался на серию параллельных прожилку пластин шириной 10 мм каждая. Полученные таким образом пробы массой 30–40 г измельчались и использовались для спектрального анализа. Исследовано распределение 16 рудных элементов (Mo, W, Sn, Be, Cu, Zn, Pb, Ag, Bi, Co, Ni, V, Mn, Fe) в гранитах непосредственно на контакте с прожилками и по мере удаления от них до 30 см. Из нескольких образцов таким же способом приготовлены пробы массой около

60 г для проведения силикатного анализа в лаборатории Геологического института СО РАН (11 петрогенных оксидов + S и F).

По результатам химического анализа, закономерное изменение состава вмещающих гранитов фиксируется в узких (1–3 см) зонах, примыкающих к рудным прожилкам, что говорит о диффузионно-метасоматической природе этих оторочек. Среди петрогенных компонентов только TiO_2 , FeO , MnO , MgO не обнаруживают значимых отклонений от фоновых значений, характерных для неизменных гранитов. По поведению других макроэлементов в околопрожилковых оторочках выделенные типы молибденит-кварцевых прожилков также заметно различаются. Для прожилков первого типа (богатых) десиликация гранитов и увеличение K_2O в околопрожилковых оторочках не характерны, а их обеднение Na_2O и Al_2O_3 проявляется в случаях повышенного содержания флюорита в жильном материале. Для околопрожилковых оторочек этой группы характерна обогащенность F и S. Прожилки второго типа (бедные) сопровождаются оторочками с фоновым содержанием F, которые резко обеднены SiO_2 и Na_2O , обогащены K_2O , иногда Al_2O_3 , Fe_2O_3 и S.

Содержание Mo в молибденит-кварцевых прожилках второго типа (0,0n–0,1 %), как правило, десятикратно ниже, чем в прожилках первого типа (0, n–n %). В то же время околорудные метасоматиты в бедных прожилках обычно обогащены Mo, W, Sn, Li, обеднены Zn, тогда как для оторочек богатых прожилков повышенные содержания Mo и Sn менее характерны, изменения содержаний Pb значительны.

Термобарогеохимические исследования

Данные о составе рудообразующих растворов и условиях формирования богатых и бедных кварц-молибденитовых прожилков получены в результате изучения кристаллов кварца, ФВ в котором

имеют пригодные размеры и подходят для изучения методами термометрии и криометрии. Наряду с доминирующими вторичными включениями в кварце обнаружены первичные относительно крупные ФВ размером 15–20 мкм и очень редко выше, удаленные от залеченных трещин и шлейфов вторичных включений. Визуально эти ФВ в разных прожилках практически однотипны (рис. 3) и относятся к ФВ гомогенного захвата, для них характерно отсутствие твердых фаз и наличие газового пузыря без видимой жидкой CO_2 .

Результаты термометрического и криометрического изучения ФВ из разных типов прожилков обобщены в табл. 2.

Интервал температур гомогенизации изученных включений в жильном кварце богатых (~314–216 °С) и бедных (~312–186 °С) прожилков близок. По данным Ф.Г. Рейфа, Е.Д. Бажеева [1] и К.З. Стельмачонка [14], температуры гомогенизации большинства первичных ФВ в прожилках варьируют в узком интервале ~250–210 °С (см. табл. 2). Температуры эвтектики меняются от -36,1 до -39 °С, что наиболее соответствует системам $MgCl_2-H_2O$, $MgCl_2-NaCl-H_2O$, $FeCl_2-H_2O$.

Температуры плавления льда в богатых прожилках варьируют в пределах от -3,9 до -8 °С, что соответствует общей солёности 6,3–11,7 масс. % экв. NaCl, в бедных прожилках – от -6 до -4 °С, что отвечает солёности 6,5–9,2 масс. % экв. NaCl. В составе газовой фазы ФВ из обоих типов прожилков по данным КР-спектроскопии идентифицированы CO_2 , CH_4 и в некоторых ФВ отмечается небольшой пик N_2 . Кроме первичных ФВ гомогенного захвата в некоторых зернах кварца обоих типов обнаружены группы мелких ($\leq 2-7$ мкм) первичных сингенетических существенно-водных и существенно-газовых включений, наличие которых свидетельствуют о периодах гетерогенизации (вскипания) рудообразующего раствора.

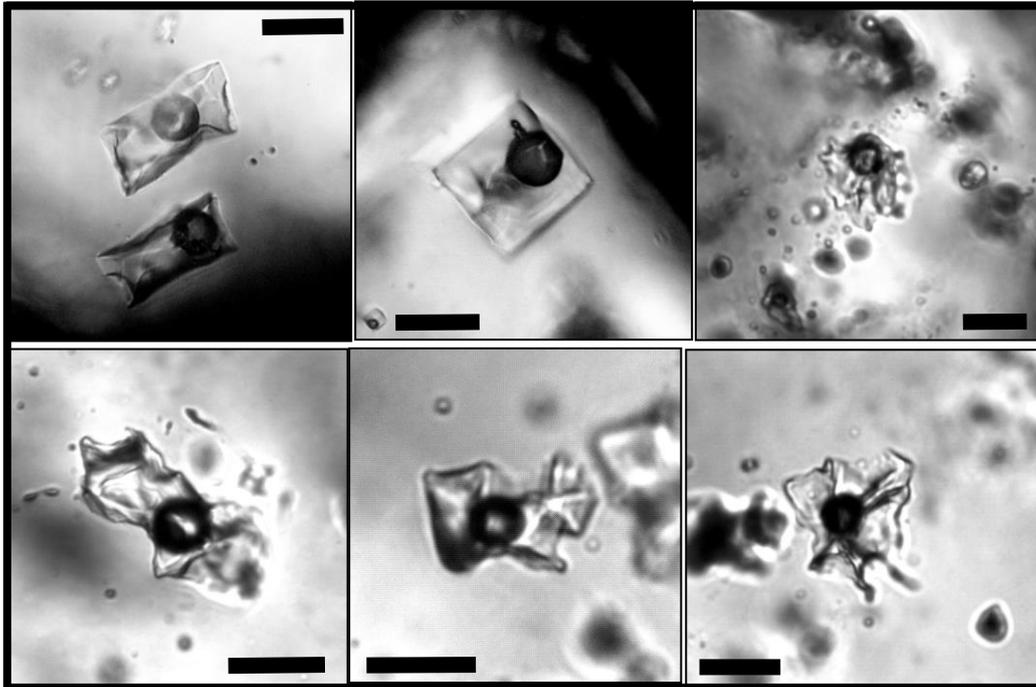


Рис. 3. Первичные флюидные включения гомогенного захвата в кварце из кварц-молибденитовых прожилков Первомайского месторождения
 Длина масштабной линейки – 10 мкм

Fig. 3. Primary fluid inclusions of homogeneous capture in quartz from quartz-molybdenite veinlets of the Pervomaiskoe deposit
 Scale bar length is 10 microns

Сводная таблица результатов микротермометрических исследований флюидных включений в кварце из рудных прожилков Первомайского месторождения
 Table 2

Summary table of the results of micro thermometric studies of fluid inclusions in quartz from ore veinlets of the Pervomaiskoe deposit

Минерал-хозяин	$T_g, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл.льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	Соленость экв. NaCl, масс. % (по источнику [3])	Общая плотность	Тип солевой системы (по источнику [4])
Кварц (богатые кварц-молибденитовые прожилки)	$\geq +314 \dots +216$	$-8 \dots -3.9$	$-37 \dots -38$	6,3–11,7	0,85–0,94	NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O MgCl ₂ -KCl-H ₂ O FeCl ₃ -H ₂ O
Кварц (бедные кварц-молибденитовые прожилки)	$+312 \dots +186$	$-6 \dots -4$	$-36,1 \dots -39$	6,5–9,2	0,89–0,94	NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O MgCl ₂ -KCl-H ₂ O FeCl ₃ -H ₂ O
Кварц (по источникам [1, 14])	$+250 \dots +210$	$-9.2 \dots -4.3$	$-27 \dots -31$			

Примечание. T_g – температура гомогенизации, $T_{\text{пл.льда}}$ – температура плавления льда, $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики.

Note. T_g – homogenization temperature, $T_{\text{пл.льда}}$ – ice melting temperature, $T_{\text{эвт}}$ – eutectic temperature.

**Металлоносность
растворов**

Методом LA-ICP-MS с вскрытием индивидуальных ФВ были определены концентрации широкого спектра элементов: Li, Be, B, F, Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, La, Ce, Ta, W, Au, Pb, Th, U (табл. 3).

Двухфазные включения в кварце кварц-молибденитовых жил при колебании общей концентрации солей в составе их растворов от 6,3 до 11,7 масс. % экв. содержат в качестве главных компонентов Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, а также B, Li. Основными рудными элементами в богатых прожилках являются Cu, Zn, W, Mo, Be. В небольших концентрациях присутствуют Nb, Zr, Pb. Такие элементы, как Th, U, Sn, La определены в небольших количествах в составе ФВ из бедных прожилков. Содержания Mo в богатых прожилках достигают 559 г/т при среднем

значении 182 г/т, тогда как в бедных они не превышают 85 г/т при среднем значении 13 г/т. По данным К.З. Стельмачонка, концентрации Mo в растворах, полученные методом АЭС-ЛВ, достигали 9,2 г/кг.

Заключение

Главным рудным минералом штокверкового Первомайского месторождения является молибденит. В качестве второстепенных и редких присутствуют следующие минеральные виды: сульфиды (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, висмутин), сульфосоли (айкинит, зальцбургит, сакураит), сложные оксиды – молибдаты, ниобаты (вульфенит, колумбит), а также берилл и акцессорные минералы (рутил, монацит, апатит, циркон).

Изучение ФВ свидетельствует о периодах эпизодического вскипания флюида. Отложение кварц-молибденитовых прожилков происходило в интервале

Таблица 3

**Содержание металлов в рудообразующих растворах
Первомайского месторождения**

Table 3

Metal content in ore-forming solutions of the Pervomaiskoe deposit

		Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Mn
1	<i>n</i> = 10	0–587	0–135	0–4163	6859–28176	0–1135	0–2650	28–13338	0–13139	0–1312
	Ср.	187	21	1037	12600	215	1003	4844	3353	493
2	<i>n</i> = 15	0–1352	0–4889	0–1526	749–31922	0–10551	0–12509	0–24056	0–41077	0–2437
	Ср.	309	122	239	13066	1136	1562	6693	9367	277
		Fe	Cu	Zn	Zr	Nb	Mo	Ag	Sn	La
1	<i>n</i> = 10	0–8241	0–2757	0–8615	0 - 216	0–62	0–559	0–13	н.п.о.	н.п.о.
	Ср.	4025	388	1419	31	11	182	2	н.п.о.	0
2	<i>n</i> = 15	0–33715	0–411	0–1642	0 - 314	0–54	0–85	0–17	0–69	0–21
	Ср.	5169	59	276	27	5	13	4	10	2
		Ce	Ta	W	Au	Pb	Th	U		
1	<i>n</i> = 10	0–7,9	н.п.о.	0–773	0–6,8	0–101	н.п.о.	н.п.о.		
	Ср.	1	н.п.о.	100	0,7	18	н.п.о.	н.п.о.		
2	<i>n</i> = 15	0–179	0–1	0–18	0–95	0–86	0–68	0–1476		
	Ср.	13	0	3	12	18	7	117		

Примечание. 1 – богатые кварц-молибденитовые прожилки; 2 – бедные кварц-молибденитовые прожилки. Верхняя строка – разброс содержаний; нижняя строка – среднее значение. Н.п.о.– ниже предела обнаружения; *n* – количество анализов.

Note. 1 – bonanza quartz-molybdenite veinlets; 2 – lean quartz-molybdenite veinlets. Top line – content variance; bottom line – average value. Н.п.о.– below the detection limit; *n* – number of tests.

температур 314–186 °С из относительно слабосоленых восстановленных растворов (6,3–11,7 масс. % экв. NaCl), содержащих CO₂, CH₄, N₂. В солевом составе растворов присутствуют хлориды NaCl, FeCl₂ и др.

В составе палеогидротерм методом LA-ICP-MS выше предела обнаружения установлены следующие элементы: Li, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, La, Ce, Ta, W, Au, Pb, Th, U, Be, B, Na, Mg, Al, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn. Содержание Mo в ФВ варьирует от

0–559 ppm (среднее значение 182) в богатых кварц-молибденитовых прожилках, в более бедных – от 0–212 ppm (среднее значение 13).

Более богатые прожилки были сформированы околонеутральными растворами с большим содержанием Mo, S и F, тогда как из растворов повышенной щелочности отлагаются относительно бедные прожилки, что позволяет считать рН растворов одним из факторов рудоносности.

Библиографический список

1. Рейф Ф.Г., Бажеев Е.Д. Магматический процесс и вольфрамовое оруденение. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.

2. Рейф Ф.Г. Условия и механизмы формирования гранитных рудно-магматических систем (по термобарогеохимическим данным). М.: Изд-во ИМГРЭ, 2009. 498 с.

3. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and application / ed. by B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Pontignano, 1994. P. 117–130.

4. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. Т. 18. № 8. С. 16–27.

5. Боровиков А.А., Говердовский В.А., Борисенко А.С., Брянский Н.В., Шабалин С.И. Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Mo-W(Ве) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 4. С. 647–662.

6. Баянов В.Д. Позднемезозойская шашанит-латитовая серия Джидинского рудного района (Юго-Западное Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1994. Т. 339. № 3. С. 374–377.

7. Гордиенко И.В., Гороховский Д.В., Смирнова О.К., Ланцева В.С.,

Бадмацыренова Р.А., Орсов Д.А. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогенетическое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 1. С. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>.

8. Игнатович В.И. Дайки и молибден-вольфрамовая минерализация Первомайской интрузии гранит-порфиров (Джидинское месторождение). Улан-Удэ: Бурятское книжное издательство, 1959. С. 29–47.

9. Малиновский Е.П. Определение пространственного положения источников рудообразующих флюидов Джидинских месторождений по данным структурного анализа // Джидинский рудный район (проблемы развития и освоения минеральных ресурсов): сб. стат. / под ред. М. Мохосоева. Новосибирск: Наука, 1984. С. 116–126.

10. Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М.: Наука, 1974. 241 с.

11. Повилайтис М.М. Основные черты минералогии Джидинского молибден-вольфрамового месторождения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 165 с.

12. Повилайтис М.М., Мозгова Н.Н., Сендерова В.М. Минералы висмута в

Джидинском молибдено-вольфрамовом месторождении (Западное Забайкалье) // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1969. Ч. 98. Вып. 6. С. 655–664.

13. Стельмачонок К.З. О синхронности образования рудовмещающих трещин и формирования молибденовой минерализации на Первомайском штокверковом месторождении (Забайкалье) и причинах трещинообразования // Доклады Академии наук. 1994. Т. 337. № 3. С. 382–385.

14. Стельмачонок К.З. О близодновременном формировании односистемных прожилков в молибденитовом штокверковом рудном теле Джидинского месторождения (Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1995. Т. 341. № 3. С. 399–402.

15. Ходанович П.Ю., Смирнова О.К. Вольфрамоносные березиты и локальный прогноз оруденения. Новосибирск: Наука, 1991. 208 с.

16. Ходанович П.Ю. Молибдено-вольфрамовые месторождения Джидинского рудного поля // Месторождения Забайкалья. Т. I. Кн. 1. Чита – М.: Геоинформмарк, 1995. С. 149–163.

17. Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д., Иванова Г.Ф. Rb-Sr-геохронометрия процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Mo месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360. № 4. С. 537–540.

References

1. Reif F.G., Bazheev E.D. *Magmatic process and tungsten mineralization* [Magmatic process and tungsten mineralization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1982, 158 p. (In Russian).

2. Reif F.G. *Usloviya i mekhanizmy formirovaniya granitnykh rudno-magmaticheskikh sistem (po termobarogeokhimicheskim dannym)* [Conditions and formation mechanisms of granite ore-magmatic systems (according to thermobaric geochemical data)]. Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements Publ., 2009, 498 p. (In Russian).

3. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. Fluid inclusions in minerals: methods and application / ed. by B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Pontignano, 1994, pp. 117–130.

4. Borisenko A.S. Study of salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by the method of cryometry. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1977, vol. 18, no. 8, pp. 16–27. (In Russian).

5. Borovikov A.A., Goverdovskii V.A., Borisenko A.S., Bryanskii N.V., Shabalin S.I. Composition and metal contents of ore-forming fluids of the Kalguty Mo-W(Be) deposit (Gorny Altai). *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2016, vol. 57, no. 4, pp. 647–662. (In Russian).

6. Bayanov V.D. Late Mesozoic shashanite-lalite series of the Dzhida ore district (South-Western Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1994, vol. 339, no. 3, pp. 374–377. (In Russian).

7. Gordienko I.V., Gorokhovskii D.V., Smirnova O.K., Lantseva V.S., Badmat-syrenova R.A., Orsoev D.A. Dzhida Ore District: Geology, Structural and Metallogenic Regionalization, Genetic Types of Ore Deposits, Geodynamic Conditions of Their Formation, Forecast, and Outlook for Development. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2018, vol. 60, no. 1, pp. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>. (In Russian).

8. Ignatovich V.I. *Daiki i molibden-vol'framovaya mineralizatsiya Pervomaiskoi intruzii granit-porfirov (Dzhidinskoe mestorozhdenie)* [Dykes and molybdenum-tungsten mineralization of the Pervomaiskaya intrusion of granite-porphyrity (Dzhida deposit)]. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1959, pp. 29–47. (In Russian).

9. Malinovskii E.P. *Opreделение prostanstvennogo polozheniya istochnikov rudoobrazuyushchikh flyuidov Dzhidinskikh mestorozhdenii po dannym strukturnogo analiza* [Spatial localization of ore-forming fluid sources of Dzhida deposits by structural analysis data]. *Dzhidinskii rudnyi raion (problemy razvitiya i osvoeniya mineral'nykh resursov)* [Dzhida ore district (problems of mineral resources development and mining)]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, pp. 116–126. (In Russian).

10. Ontoev D.O. *Stadiinost' mineralizatsii i zonal'nost' mestorozhdenii Zabaikal'ya* [Mineralization staging and zoning of Transbaikalian deposits]. Moscow: Nauka Publ., 1974, 241 p. (In Russian).

11. Povilaitis M.M. *Osnovnye cherty mineralogii Dzhidinskogo molibden-vol'framovogo mestorozhdeniya* [Main features of the Dzhida molybdenum-tungsten deposit mineralogy]. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1960, 165 p. (In Russian).

12. Povilaitis M.M., Mozgova N.N., Senderova V.M. Bismuth minerals in the Dzhida molybdenum-tungsten deposit (Western Transbaikalia). *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the All-Union Mineralogical

Society], 1969, part 98, issue 6, pp. 655–664. (In Russian).

13. Stel'machonok K.Z. On formation synchronicity of ore-hosting faults and molybdenum mineralization formation in the Pervomaisky stockwork field (Transbaikalia) and the causes of faulting. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1994, vol. 337, no. 3, pp. 382–385. (In Russian).

14. Stel'machonok K.Z. On the simultaneous formation of single-system veinlets in the molybdenite stockwork ore body of the Dzhida deposit (Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1995, vol. 341, no. 3, pp. 399–402. (In Russian).

15. Khodanovich P.Yu., Smirnova O.K. *Vol'framonosnye berezity i lokal'nyi prognoz orudneniya* [Tungsten beresites and local forecast of mineralization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1991, 208 p. (In Russian).

16. Khodanovich P.Yu. *Molibdeno-vol'framovye mestorozhdeniya Dzhidinskogo rudnogo polya* [Molybdenum-tungsten deposits of the Dzhida ore field]. *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya* [Deposits of Transbaikalia]. Vol. I. Book 1. Chita – Moscow: Geoinformmark Publ., 1995, pp. 149–163. (In Russian).

17. Chernyshev I.V., Gol'tsman Yu.V., Bairova E.D., Ivanova G.F. Rb-Sr-geochronometry of sequential formation of granites, greysening and hydrothermal mineralization: Dzhida W-Mo deposit, Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1998, vol. 360, no. 4, pp. 537–540. (In Russian).

Критерии авторства

Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Damdinova L.B., Damdinov B.B. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-50-66>

ОПЫТ МНОГОФАКТОРНОГО ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ГОЛЮБИНСКО-ОЛЛАМИНСКОГО НЕФРИТОНОСНОГО ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

© А.П. Кочнев^а, Д.А. Краснов^б, Р.Н. Иванова^с

^{а-с}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: При проведении поисково-оценочных и разведочно-эксплуатационных работ традиционный формационно-геотектонический метод прогнозирования малоэффективен – эти работы проводятся на небольших по размерам объектах, которые находятся в пределах одной геотектонической области на площади развития одной формации. В этих условиях необходимо привлечение косвенных поисковых признаков, отражающих вероятностный характер связи процессов минерогенеза с геологическими комплексами разного типа. Особенно это актуально для месторождений нефрита, которые в большинстве случаев относятся к малым и сверхмалым объектам с очень ограниченным количеством запасов. В данной статье изложен опыт локального многофакторного прогнозирования Голубинско-Олламинского нефритоносного поля. Показано, что применение традиционных методов прогнозирования с использованием минерогенических факторов первого рода малоэффективно. Для локального прогнозирования нефрита предложено использовать минерогенические факторы второго рода и косвенные поисковые признаки, которые не нашли отражения на исходных картах, но несут информацию о вероятности наличия или отсутствия залежей нефрита. Оценка их потенциальной нефритоносности дана с применением методов математической статистики. Минерогеническое районирование площади проведено путем составления многофакторной прогнозной карты с выделением на ней участков с разной степенью перспективности. Реализована следующая этапность локального прогнозирования: дан анализ геологического строения площади с выделением нефритоконтролирующих структурно-вещественных комплексов как минерогенических факторов второго рода; выделены косвенные поисковые признаки; дана оценка информативности разных контролирующих признаков и суммарной информативности участков сочетания признаков каждой категории факторов; составлены однофакторные прогнозные карты-схемы и многофакторная прогнозно-поисковая карта нефритоносности Голубинско-Олламинского поля. Предлагаемая методика прогнозирования даже на ограниченном объеме исходных геологических данных позволяет провести районирование территории по степени перспективности и выделить участки для постановки поисков нефрита.

Ключевые слова: нефрит, локальное многофакторное прогнозирование, информативность геологических признаков, Голубинско-Олламинское поле

Информация о статье: Дата поступления 6 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 13 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

^аКочнев Анатолий Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования, тел.: 8 (3952) 405687, e-mail: kochnev@istu.irk.ru

Anatoly P. Kochnev, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsurface Resource Management, tel.: 8 (3952) 405687, e-mail: kochnev@istu.irk.ru

^бКраснов Дмитрий Александрович, студент, тел.: 8 (3952) 405687, e-mail: dkrasnov88@mail.ru

Dmitriy A. Krasnov, Student, tel.: 8 (3952) 405687, e-mail: dkrasnov88@mail.ru

^сИванова Раиса Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования, тел.: 8 (3952) 405687, e-mail: ivanova_rn@istu.edu

Raisa N. Ivanova, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsurface Resource Management, tel.: 8 (3952) 405687, e-mail: ivanova_rn@istu.edu

Для цитирования: Кочнев А.П., Краснов Д.А., Иванова Р.Н. Опыт многофакторного локального прогнозирования на примере Голубинско-Олламинского нефритоносного поля (Республика Бурятия). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):50–66. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-50-66.

EXPERIENCE OF MULTIFACTOR LOCAL FORECASTING ON EXAMPLE OF THE GOLUBINSKO-OLLAMINSKOE NEPHRITE FIELD (REPUBLIC OF BURYATIA)

© Anatoly P. Kochnev^a, Dmitry A. Krasnov^b, Raisa N. Ivanova^c

^{a–c}Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT: The traditional formation and geotectonic method of forecasting is ineffective when carrying out prospect evaluation survey and exploration development works as these works are carried out on small-sized objects located within the same geotectonic region on the development area of one formation. Under these conditions, it is necessary to attract indirect prospecting factors that reflect the probabilistic nature of the relationship between the minerogenesis processes and geological complexes of various types. This is especially true for nephrite deposits, which generally belong to small and ultra-small objects with a very limited amount of reserves. This paper presents the experience of local multifactorial forecasting of the Golyubinsko-Ollaminskoe nephrite field. The low efficiency of traditional forecasting methods using mineragenic factors of the first kind is shown. It is proposed to carry out local forecasting of nephrite using the mineragenic factors of the second kind and indirect prospecting factors, which are not reflected on the source maps but are informative on the probability of the presence or absence of nephrite deposits. Their potential nephrite content is evaluated using the methods of mathematical statistics. Mineragenic zoning of the area is performed by compiling a multifactor forecast map with the specification of areas with varying degrees of prospects. The following phasing of local forecasting is implemented: the geological structure of the area is analyzed and nephrite-controlling structural and material complexes are classified as mineragenic factors of the second kind; indirect search features are identified; assessment is given to the informative content of various controlling factors and total informativeness of the sections of the combination of features of each category of factors. Single-factor forecast maps and a multi-factor forecast search map of the Golyubinsko-Ollaminskoe field nephrite content is compiled. The proposed forecasting methods even on a limited amount of initial geological data allows area zoning according to the degree of prospects and identification of sites for nephrite search.

Keywords: nephrite, local multifactorial forecasting, informativeness of geological features, Golyubinsko-Ollaminskoe field

Information about the article: Received November 6, 2018; accepted for publication December 13, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kochnev A.P., Krasnov D.A., Ivanova R.N. Experience of multifactor local forecasting on example of the Golubinsko-Ollaminskoe nephrite field (Republic of Buryatia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):50–66 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-50-66.

Введение

Прогнозирование является обязательной составной частью любой стадии геолого-разведочного процесса, так как его результаты позволяют проводить проектирование поисковых и разведочных работ, а также выбирать оптималь-

ную методику их проведения. На ранних стадиях геологического изучения при геолого-съёмочных работах разного масштаба осуществляется региональное прогнозирование на геотектонической и формационной основе. При выполнении поисково-оценочных и разведочно-

эксплуатационных работ формационно-геотектонический подход недостаточен, так как условия их проведения ограничены малыми размерами объектов (перспективных участков, месторождений, отдельных залежей и т. д.), которые, как правило, находятся в одной геотектонической области на площади развития одной формации.

В таких условиях для производства поисковых работ необходимо привлечение косвенных поисковых признаков, которые отражают вероятностный характер связи процессов минерагенеза с геологическими комплексами разного типа. Использование этой группы признаков должно базироваться на основе современных методик локального прогнозирования, таких как мультифакторное моделирование, математическое моделирование, 3D-моделирование и т. п. Особенно это важно для небольших месторождений минерального сырья, в частности для месторождений нефрита, в большинстве случаев представляющих собой ультрамалые объекты, величина промышленных запасов которых очень ограничена. Для этих объектов часто практикуется совмещение работ разных стадий – от поисков до эксплуатации.

В предлагаемой статье авторы делятся опытом локального многофакторного прогнозирования в пределах Голубинско-Олламинского нефритоносного поля, для которого ранее был проведен анализ геологического строения и сформулированы базовые минерагенические факторы и признаки нефритоносности. При проведении таксонометрического анализа изучаемой территории установлено [1, 2], что Голубинско-Олламинское поле является составной частью Витимского нефритоносного района, имеющего в своем составе небольшое количество апокарбонатных месторождений и проявлений нефрита. Как было показано результатами предыдущих исследований [1], на данной площа-

ди известно два нефритовых месторождения этого промышленно-генетического типа – Голубинское и Нижне-Олламинское. На этой же территории выявлена крупная залежь Сергеевская и частично отработано более десяти других залежей светлого нефрита.

Большинство выявленных в районе месторождений апокарбонатного нефрита в данный момент энергично вырабатывается. С учетом последнего обстоятельства представляется очень своевременным поиск новых проявлений и залежей нефрита.

При этом следует использовать как прогнозную оценку перспективных территорий, так и современные многофакторные модели.

Для осуществления этой задачи прежде всего необходимо провести анализ геологического строения уже выявленных нефритовых месторождений и выделить их основные характерные особенности, установить геологическое положение и основные закономерности образования. Также необходимо определение пространственного размещения залежей нефрита внутри Витимского района.

На данном этапе исследования необходимо выбрать рациональную методику прогнозирования и составить многофакторную прогнозно-поисковую модель исследованной площади с учетом опыта и рекомендаций специалистов по поискам и разведке месторождений нефрита, таких как Р.С. Замалетдинов [3], А.Н. Сутурин, Н.В. Секерина [4], R.L. Shere [5], G.E. Harlow [6, 7], A.F. Cooper [8] и др.

Краткая геологическая характеристика района

Геология Голубинско-Олламинского района достаточно разнообразна. Изучение фондовых материалов геолого-съёмочных, поисково-разведочных и эксплуатационных работ позволило установить наличие среди геологических

образований гранитоидов витимканского интрузивного комплекса, формирование которого происходило в каменноугольном периоде, и осадочно-метаморфических пород восточно-горбылокской свиты, возраст которой предположительно установлен как раннепротерозойский. Кроме того, на территории района широкое развитие получили разнообразные метасоматические образования.

В регионально-метаморфизованных парапородах эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций локально проявлен наложенный контактовый метаморфизм амфибол-роговиковой ступени с формированием зеленых хлоритизированных кварц-полевошпат-амфиболовых кристаллосланцев. При детальном изучении установлено, что они являются диафторитами [1].

Такой вывод был сделан на основании прослеживания участков перечисленных выше пород только в зоне, которая в пределах самих нефритовых залежей имеет значительное количество гидротермально-метасоматически измененных образований. Зоны проявления диавторитов имеют отчетливо выраженную тектоническую и гидротермально-метасоматическую переработку слагающих их пород. За пределами этих зон хлоритизация не наблюдается или проявлена значительно слабее.

Гранитоиды витимканского комплекса, занимающие практически пятьдесят процентов региона, представлены двумя фазами: plutonic и жильных пород. Первая – это преимущественно крупные неправильные массивы гранитоидов, в которых содержатся скиалиты – теньевые фрагменты метаморфических пород, обогащенные темноцветными минералами. Вторая фаза – это в основном небольшие штокообразные тела биотитовых и лейкократовых мелко-среднезернистых гранитов и жильный комплекс пород. Вблизи разломов гра-

нитоиды витимканского комплекса претерпели процессы катаклаза и окварцевания.

В эндоконтактной зоне магматических образований хорошо наблюдаются ксенолиты вмещающих пород, имеющие резкие контакты по отношению к основной массе вмещающих пород с направлением падения в сторону последних. Граниты здесь, как правило, имеют мелкозернистую структуру, реже гнейсовидную текстуру. В этой же группе пород, по нашим данным [1], иногда встречаются гигантопорфировидные и пегматоидные структуры. Преобразованные граниты эндоконтактов обладают более светлой окраской, в которой отчетливо можно наблюдать зеленоватый оттенок. Эти породы по составу ближе к граносиенитам и сиенитам. Наиболее характерной минералогической особенностью для них является практически полное отсутствие кварца наряду с высоким содержанием альбита и присутствием карбоната, мусковита, сфена и апатита.

По данным А.Н. Сутурина, Р.С. Замалетдинова, Н.В. Секериной [4], зоны экзоконтактов несут следы интенсивного воздействия гранитоидов на вмещающие породы. Это проявлено в ороговивании кристаллосланцев и гнейсов, мраморизации и скарнировании доломитов. Непосредственно на границах с магматическими образованиями гранитоидов метасоматиты имеют контрастный химический состав [2] и сложены доломитовыми мраморами и породами с большим количеством образований $\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$ – алюмосиликатов.

Метасоматиты зон скарнирования на контакте гранитов с мраморами – это эпидот-кальцит-тремолитовые скарны в виде маломощных от 20 до 50 см линз и жилообразных образований в тектонически ослабленных краевых частях ксенолитов мраморов или на небольшом удалении от контакта с гранитами.

Залежи нефрита приурочены в основном к пачкам доломитовых мраморов [3], часто перекристаллизованных, окварцованных и скарнированных, с широким развитием тремолита, диопсида, серпентина, кварца, изредка встречаются слюда и форстерит.

Проведение тектонического районирования показало [1], что изучаемый Витимский нефритоносный район представляет собой часть гигантского Байкало-Муйского мегаблока, который известен как сложное складчатое сооружение антиклинорной формы. Данный блок ограничен зонами глубинных разломов, и образование его структур связано с тектоническими процессами разного возраста в интервале времени от нижнего протерозоя до пермского периода. На территории нефритоносного района наблюдаются метаморфические породы восточногогорбылокской свиты, которые смяты в Аманак-Буромскую синклинали каледонского возраста. Эта структура фиксируется небольшими фрагментами ее крыла, имеющего падение в направлении на юго-восток под углами 40–50° и осложненного многочисленными разрывными нарушениями.

Гранитоиды витимканского комплекса, слагающего Ангаро-Витимский ареал-плутон, принадлежат к герцинскому структурному этажу, в пределах которого широко развиты разрывные нарушения разных систем и кинематических типов, определяющие сложную разломно-блоковую структуру территории [1, 4] и играющие важную контролируемую залежи нефрита роль.

В пределах Витимского района отчетливо наблюдается цепочечное распределение выявленных нефритовых месторождений и проявлений. По всей видимости, это связано с приуроченностью их к направлениям возможных латентных разрывных структур, контролируемых нефритовые объекты. Геолого-структурные особенности нефритонос-

ного поля изучены недостаточно полно. Выход парапород в виде разобщенных ксенолитов в поле гранитоидов затрудняет расшифровку складчатой структуры. Предполагается, что они являются фрагментами антиклинальной складки, к замку которой приурочены месторождения нефрита [4].

Непосредственно на площади исследования широко распространены разрывные нарушения, образующие сложную сеть [1, 4] с преобладанием разломов северо-восточного и северо-западного простирания, а оперяющие их субширотные зоны повышенной трещиноватости контролируют метасоматические образования постмагматического этапа становления гранитоидов, с которыми генетически связаны процессы образования нефрита.

На территории Голубинско-Олломинского поля выявлено несколько продуктивных скарновых зон мощностью от 2 до 2,5 м и протяженностью от 7 до 150 м.

Залежи нефрита в таких зонах имеют сложную жиллообразную форму с большим количеством ветвящихся апофиз. Значительно реже можно наблюдать гнезда, прожилки и линзы простые по морфологии. Залежи имеют элементы падения контактов в основном в северо-западном, иногда в юго-восточном направлении под углом от 45 до 80°. Наиболее промышленно значимые нефритовые залежи, как правило, имеют тектонический контакт со скарнами, в которых во многих случаях наблюдаются зеркала скольжения.

Выделяют три типа залежей нефрита по их геологической позиции: связанные с контактами гранитов и доломитовых мраморов; прослеживающиеся вдоль границ кристаллосланцев полевошпат-кварц-амфиболового состава и доломитовых мраморов; находящиеся непосредственно в теле мраморов и не имеющие заметной связи с гранитами и

кристаллосланцами. Самые длинные (до 100 м и более) нефритовые залежи относятся ко второму типу. Они имеют наиболее постоянные значения одного из важнейших параметров – мощность от 0,7 до 1,2 м. В то же время другие типы характеризуются хаотичным расположением выделений нефрита в кальцит-тремолитовом субстрате, которое создано брекчиевидным мозаичным строением нефритоносных скарновых зон.

Методика и результаты исследования

Изложенные выше данные о геологическом строении Голюбинско-Олломинского нефритоносного поля и структурно-геологической позиции известных залежей нефрита позволяют определить первостепенные минерагенические факторы локализации и поисковые признаки проявлений апокарбонатного нефрита, хотя условия их формирования изучены еще недостаточно.

К прямым поисковым признакам нефритоносности относятся механические ореолы рассеяния, точки минерализации и установленные месторождения нефрита. Данные признаки отображают развитие образования нефрита в определенных геологических ситуациях [3–8].

Косвенные поисковые признаки и минерагенические факторы нефритоносности устанавливаются при расшифровке структурно-геологического положения залежей нефрита. Для изучаемого объекта – Голюбинско-Олломинского нефритоносного поля – нами было выделено четыре категории таких факторов и признаков: литолого-стратиграфические, магматические, минерально-парагенетические и структурно-тектонические [1]. Эти категории отражают большинство значимых особенностей геологии района и позволяют определить как условия формирования, так и все основные закономерности распре-

деления известных нефритовых месторождений.

Специальный анализ этих факторов позволяет дать их краткую формулировку:

– литолого-стратиграфический фактор демонстрирует пространственную и генетическую связь нефрита с доломитовыми мраморами восточно-горбылокской свиты, другие литологические разновидности пород свиты (кристаллосланцы, метапесчаники, метаэффузивы) являются неблагоприятными признаками нефритоносности;

– магматический фактор отражает связь расположения нефрита в доломитах из экзоконтактов гранитоидных тел и даек кислых пород витимканского комплекса;

– структурно-тектонический фактор выражен в контроле нефритовых залежей разломными структурами – все известные залежи распределяются вдоль разломов либо находятся в зонах, оперяющих основной разлом трещин в местах скрещивания зон разломов различных систем;

– минерально-парагенетический фактор обнаруживает парагенетическую связь нефрита с процессом метасоматоза в парапородах, наиболее часто нефритовые залежи приурочены к зонам скарнирования мраморов, которые представлены кальцитом и тремолитом с примесью талька и серпентина, а также к зонам, в которых наблюдается развитие эпидота в кристаллосланцах и гранитах с образованием эпидот- и хлоритсодержащих пород зеленосланцевой фации.

Эти факторы первого рода могут быть использованы только на региональном уровне прогноза, когда проводится оконтуривание площади развития перспективных структурно-вещественных комплексов (гранитоидных магматических образований витимканского комплекса с ксенолитами карбонатов во-

сточно-горбылокской свиты), разрывных нарушений, контролирующих нефритовые тела и участки развития процессов метасоматоза, которые практически совпадают и охватывают большую часть потенциально нефритоносной территории района.

На локальном уровне прогнозирования, когда выделяются участки разной степени перспективности [9, 10], сопоставимые с конкретными залежами нефрита, на которых рационально выполнять детальные поисково-разведочные работы, данные признаки малоинформативны [1, 3, 4–8].

Для решения этой задачи предлагается использовать косвенные поисковые признаки и минерагенические факторы второго рода, отражающие свойства продуктивных структурно-вещественных комплексов и латентные проявления геологических процессов, которые могут нести определенную информацию о вероятности наличия или отсутствия залежей нефрита в рассматриваемом участке района. Эти признаки не нашли отражения на исходных картах, но могут быть выявлены путем специального анализа.

По нашим данным [1], в пределах литолого-стратиграфического фактора нефритоносности косвенными поисковыми признаками второго рода могут быть площади выхода отдельных стратиграфических пачек продуктивной восточно-горбылокской свиты. По составу пород это пачки кристаллосланцев, доломитовых мраморов, метапесчаников и метаэффузивов. Вместе с тем на используемой геологической карте района выходы этих пород можно наблюдать только в виде одиночных ксенолитов, причем они не расчленены по литолого-петрографическому составу, поэтому оценить степень их потенциальной нефритоносности невозможно.

Учитывая пространственно-генетические связи нефритовой минерализа-

ции с доломитовыми мраморами, их выходы можно считать положительным поисковым признаком этой группы факторов. Для дифференциации значительной по размерам площади выходов ксенолитов мраморов по степени перспективности на нефрит необходимо оценить концентрацию этих ксенолитов на площади исследования.

С этой целью составлена однофакторная прогнозная карта-схема (рис. 1), на которой отмечены известные проявления нефрита, а области с разной степенью концентрации мраморов (см. рис. 1, а) оконтурены изолиниями с выделением пяти категорий участков с разной плотностью: 0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8; 0,8–1.

Авторами установлено [1], что косвенными поисковыми признаками второго рода при использовании магматического фактора нефритоносности могли бы быть площади выхода разных петрографических типов, фаз и фаций гранитоидов продуктивного витимканского комплекса. Но необходимо учесть тот факт, что по исходной карте района это сделать практически невозможно без проведения специального дополнительного геологического изучения, так как выходы пород данного магматического комплекса не расчленены по петрографическому составу. Можно лишь оценить концентрацию выходов нерасчлененных гранитоидов, для чего составлена однофакторная прогнозная карта-схема, на которой отмечены известные проявления нефрита, а области с разной степенью концентрации гранитоидов оконтурены изолиниями с выделением пяти категорий участков с разной плотностью концентрации гранитов: 0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8; 0,8–1 (см. рис. 1, б).

Кроме того, в предыдущих исследованиях достаточно обоснованно было показано, что косвенными поисковыми признаками второго рода среди

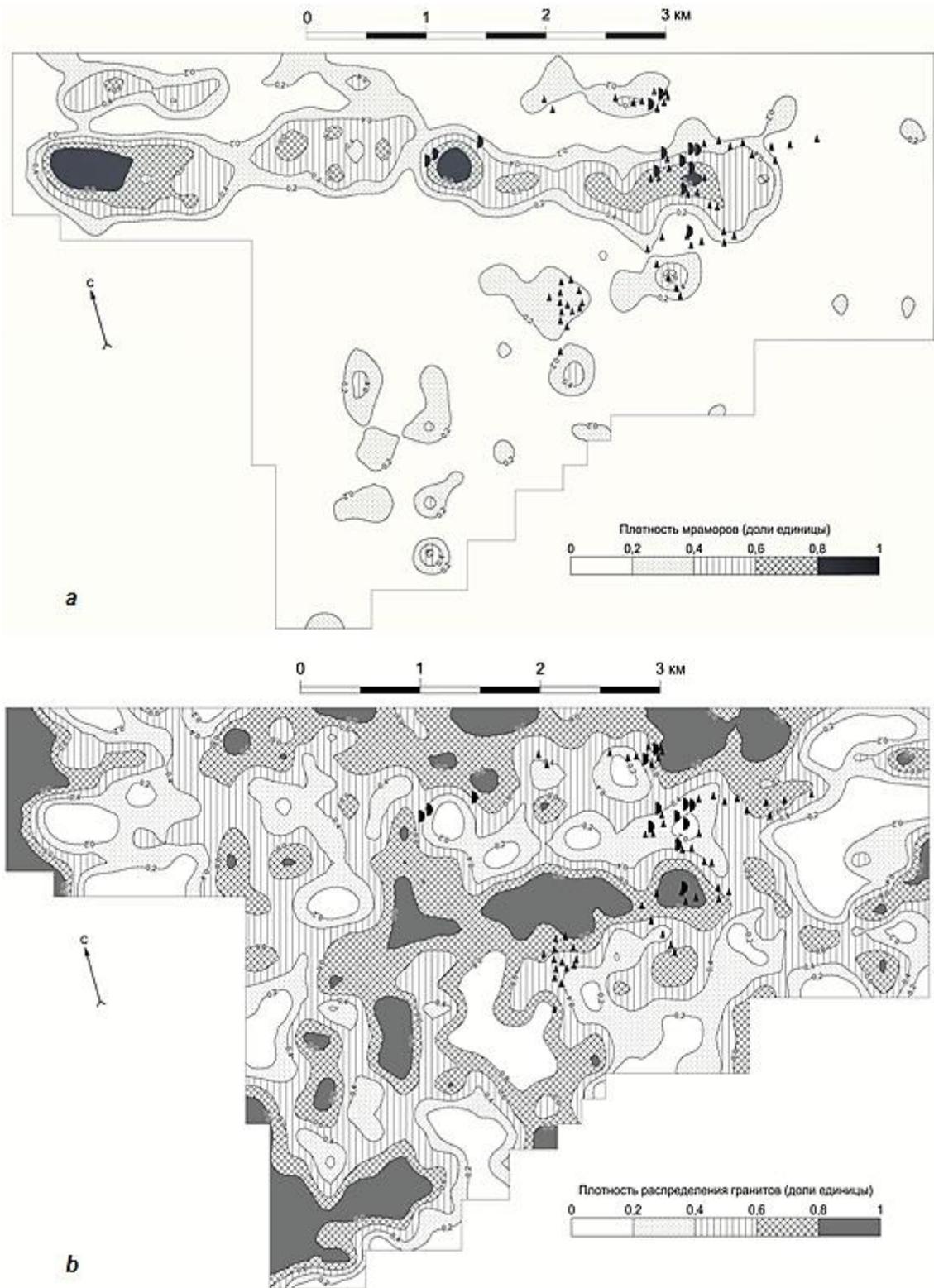


Рис. 1. Однофакторная прогнозная карта нефритонасности Голубинско-Олломинского поля на основе схемы плотности распределения горных пород:

a – мраморов; b – гранитов

Fig. 1. Unifactor forecast map of nephrite content of Golyubinsko-Allominskoe field based on the rock density distribution diagram:

a – marbles; b – granites

элементов структуры и тектоники могут быть участки развития разнообразных структурных образований разрывного и складчатого генезиса, например различные по ориентировке и кинематическому типу системы разрывных нарушений, замковые части и разные крылья складок и т. п. [1]. Однако по результатам анализа исходной карты района сделан вывод о том, что без целенаправленных работ доизучения геологического строения данной территории реально рассмотреть лишь разломную тектонику района, так как складчатые структуры предшествующими работами закартированы нечетко.

На исследуемой территории наблюдается сложная сеть разломов (рис. 2). Отчетливо выражены три системы разрывных нарушений: северо-восточная с азимутами простирания

в диапазоне от 50 до 60°, субширотная – 260–290° и северо-западная – 310–330°.

Как известно, контролирующая роль разломов выражается не только в непосредственной приуроченности рудопоявлений к поверхностям сместителей таких разломов, когда они являются рудовмещающими структурами, но и в концентрации их в оперяющих трещинах на определенном расстоянии от сместителя, то есть к определенной части области динамического влияния разломов, которые считаются рудоподводящими и рудораспределяющими структурами. При этом достаточно отчетливо проявляется приуроченность залежей нефрита к зоне интенсивного развития субширотных разломов и к участкам их сопряжения с разрывными нарушениями других систем.

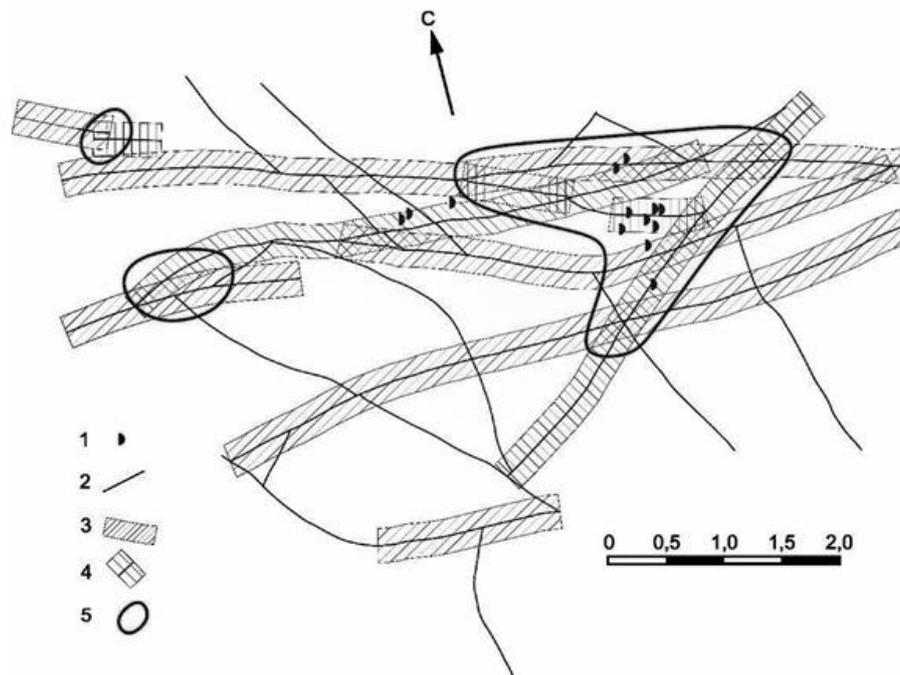


Рис. 2. Однофакторная прогнозная карта нефритонасности Голубинско-Олломинского поля, совмещенная с картой разломной тектоники:

1 – залежи нефрита; 2 – разрывные нарушения; 3, 4 – зоны динамического влияния основных разломов: 3 – северо-восточного простирания, 4 – субширотного простирания;
5 – потенциальные нефритонасные узлы

Fig. 2. Unifactor forecast map of the Golubinsko-Ollominskoe field nephrite content combined with the fault tectonics map:

1 – nephrite deposits; 2 – faults; 3, 4 – zones of main fault dynamic influences:
3 – northeastern strike, 4 – sublatitudinal strike; 5 – potential nephrite nodules

При анализе карты разломной тектоники (см. рис. 2) и неравномерности распределения залежей нефрита относительно разломов разных систем установлено, что все они находятся в пределах зоны динамического влияния разломов шириной до 300 м. Максимальная концентрация проявлений нефрита наблюдается в двух интервалах зоны динамического влияния разломов – в интервале от 200 до 300 м широтных и северо-восточных разломов и в интервале от 100 до 200 м зоны динамического влияния разломов участков сопряжения этих разломов с разрывными структурами других систем. Именно такие зоны влияния контролирующих разломов можно считать потенциально перспективными, то есть положительными поисковыми признаками нефритоносности.

Визуально достаточно отчетливо проявляется приуроченность залежей нефрита к зоне интенсивного развития субширотных разломов и к участкам их сопряжения с нарушениями других систем. Эта закономерность подтверждается при анализе морфологических особенностей залежей нефрита [4] и их структурной позиции. Главную роль в контроле расположения залежей нефрита имеют малые структурные формы – зоны сланцеватости и трещиноватости вмещающих пород.

По отношению к моменту формирования они подразделены на три категории: полосчатость и сланцеватость в парапородах, которые пересечены телами нефрита – дорудные, контакты нефритовых залежей – синрудные, а также не несущие какую-либо минерализацию трещины неотектонического происхождения в залежах нефрита – пострудные. Синрудные дислокации имеют в основном субширотную ориентировку с направлением падения на север под углами от 60 до 80°. Значительно реже наблюдаются трещины, имею-

щие северо-восточное простирание и направление падения на юго-восток под углами от 50 до 70°. Следовательно, контролирующими нефритовые залежи являются разрывные структуры северо-восточного и субширотного простирания.

Косвенными поисковыми признаками в пределах минерально-парагенетического фактора нефритоносности, по всей видимости, могут быть участки развития зон эпидотизации в гранитах и кристаллосланцах, тремолит-кальцитовых скарнов, оталькования и серпентинизации доломитовых мраморов и т. д., сформированные в результате процессов метасоматоза вмещающих пород. При этом нами учитывается тот факт, что при использовании существующих геологических карт подобные площади трудно выделить, так как минералы, имеющие парагенетическую связь с нефритом, наблюдаются лишь в разведанных залежах. Для остальной территории при геолого-стратиграфическом картировании результаты данных процессов не показаны или зафиксированы лишь в единичных точках [1]. Поэтому для обоснованного применения этой категории факторов требуется проведение минералогического картирования потенциально-перспективной площади.

Таким образом, в процессе локального прогнозирования составлены три однофакторные модели нефритоносности Голюбинско-Олломинского поля, которые служат основой для составления многофакторной прогнозно-поисковой модели территории: по концентрации доломитов и гранитоидов и по зонам динамического влияния рудо-контролирующих разломов (см. рис. 1, 2).

Получение многофакторной модели при качественном прогнозировании возможно путем традиционного наложения однофакторных моделей и выделения наиболее перспективных площадей в виде участков совмещения перспек-

тивных территорий по разным факторам. Однако более эффективным представляется [1, 4, 9–11] локальное количественное прогнозирование путем оценки информативности разных контролирующих признаков и расчета суммарной информативности участков сочетания разных признаков каждой группы факторов.

Однофакторные модели представляют собой отдельные слои, созданные с помощью современного программного обеспечения (CorelDRAW, AutoCAD, Photoshop и др.). При их создании используемые признаки нумеруются, при этом устанавливается масштаб оруденения по числу проявлений нефрита [1, 9].

Для составления таких моделей предварительно проводится разделение территории исследования (рис. 3) на элементарные участки (ЭУ) – небольшие участки площади, которые сопоставимы с изучаемыми объектами прогноза и шириной выхода или влияния нефритоконтролирующих признаков.

Для изометричных в плане объектов и при разной ориентировке контро-

лирующих элементов оптимальной является квадратная форма ЭУ. Размер ЭУ определяется прежде всего масштабом исследований, а также характером объекта и разнообразием геологических образований и структур, которые обуславливают сложность строения территории, но чаще всего при локальном прогнозе он принимается равным 1% исходной площади изучения [9, 11].

Площадь Голюбинско-Олломинского поля составляет 36 км², следовательно, площадь ЭУ будет равна 0,36 км², а сторона квадратного участка – 600 м. При масштабе прогнозирования 1:10000 размер ЭУ составит 6×6 см.

Размер нефритовых залежей составляет в среднем 30–50 м по простиранию (максимальная длина залежи – 150 м), следовательно, ЭУ размером 6×6 см для этого рудного поля излишне крупные – ширина выхода некоторых контролирующих признаков значительно меньше. С учетом этого для упрощения расчетов примем длину стороны ЭУ равной 200 м.

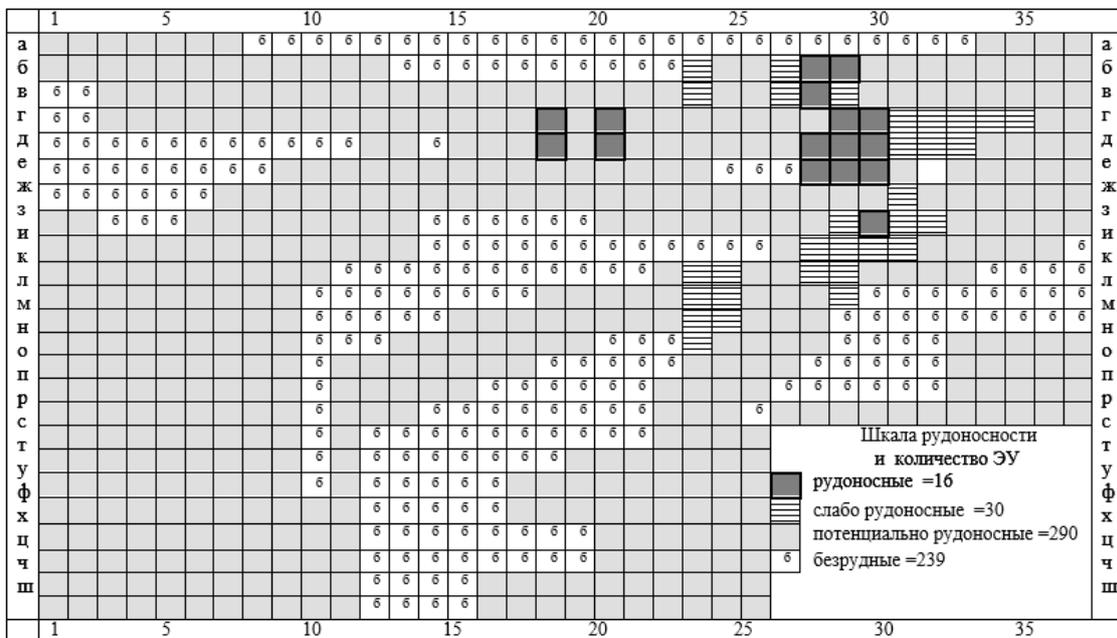


Рис. 3. Схема разграничения площади исследования на элементарные участки с оценкой их рудоносности

Fig. 3. Diagram of the study area zoning into elementary sites and evaluation of their ore content

На площади прогнозирования выделено 575 ЭУ, которые разделены на четыре категории: «рудоносные» (с залежами – 16 ЭУ); «потенциально-рудоносные» (с точками минерализации нефрита в глыбах – 30 ЭУ); «безрудные» (на площади развития отрицательных контролирующих признаков – 239 ЭУ); «потенциально-перспективные» (остальные 290 ЭУ).

Для всех выделенных участков регистрируются нефритоконтролирующие признаки, в пределы которых попадают центральные точки ЭУ. Далее проводится установление значимости каждого признака J_i и суммарная содержательность каждого ЭУ J_j в виде матрицы по форме табл. 1 и 2.

Таблица 1
Систематизация результатов анализа минерагенических факторов и рудоконтролирующих признаков

Table 1
Systematization of the analysis results of mineragenic factors and ore controls

Минерагенические факторы и рудоконтролирующие признаки			Количество ЭУ с пр. = m_i	Количество РЭУ = n_i	$J_i = \lg(12,5n_i/m_i)$					
					-1				0	
Литолого-стратиграфические факторы второго рода										
1	Плотность концентрации мраморов	0–0,2	381	11	-0,44					
2		0,2–0,4	110	22					0,4	
3		0,4–0,6	53	8					0,28	
4		0,6–0,8	20	3					0,27	
5		0,8–1	11	2					0,36	
Магматические факторы второго рода										
6	Плотность концентрации гранитов	0–0,2	64	2	-0,41					
7		0,2–0,4	81	6	-0,03					
8		0,4–0,6	161	14					0,04	
9		0,6–0,8	149	15					0,10	
10		0,8–1	119	9	-0,02					
Структурно-тектонические факторы второго рода										
11	Зоны динамического влияния, м	≥300	313	20	-0,1					
12		200–300	Северо-восточных разрывных структур	33	5				0,28	
13			Широтных разрывных структур	91	9				0,1	
14			Северо-западных разрывных структур	72	4	-0,16				
15		100–200	Зон сопряжения широтных и северо-восточных разломов	41	5				0,18	
16			Зон сопряжения широтных и северо-западных разломов	16	3				0,37	
17			Зон сопряжения северо-восточных и северо-западных разломов	11	2				0,36	

Таблица 2

Расчет суммарной информативности элементарных участков

Table 2

Calculation of the total information content of elementary sites

Но- мер ЭУ	Литологические признаки						Магматические признаки				Структурно-тектонические признаки							Инф. $\sum J_i$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
a1					0,36					-0,02	-0,1							0,24
в26	-0,44					-0,41							0,1					-0,75
в27		0,4						0,04							0,18			0,64
$\sum m_i$	381	110	53	20	11	64	81	161	149	119	313	33	91	72	41	16	11	
$\sum n_i$	11	22	8	3	2	2	6	14	15	9	20	5	9	4	5	3	2	
J_i	-0,44	0,4	0,28	0,27	0,36	-0,41	-0,03	0,04	0,1	-0,02	-0,1	0,28	0,1	-0,16	0,18	0,37	0,36	

Примечание. Цветом выделены положительные значения информативности признаков и ЭУ.
Note. Positive values of feature informativeness and elementary sites are highlighted.

Информативность признака J_{A_i/B_i} определяется по известной формуле Е.Б. Высокоостровской и Д.С. Зеленецкого [12]:

$$J_{A_i/B_i} = \lg[P(A_i/B_i)/P(A_i)], \quad (1)$$

где $P(A_i/B_i)$ – вероятность появления признака A_i в пределах рудоносных участков; $P(A_i)$ – вероятность появления признака A_i на всей исследованной территории.

При замене вероятностей частотами встречаемости признаков формула приобретает следующий вид:

$$J_i = \lg(M \cdot n_i / N \cdot m_i), \quad (2)$$

где J_i – информативность i -го нефритоконтролирующего признака; n_i – число «рудных» ЭУ на площади влияния i -го признака; m_i – число ЭУ в пределах площади выхода этого признака; M – общее число ЭУ на площади исследования (575 ЭУ); N – общее число «рудных» ЭУ на всей площади исследования (46 ЭУ).

Формула (2) может быть упрощена, поскольку на площади исследования параметры M и N – величины постоянные, их отношение можно заменить постоянным коэффициентом $K = M/N$, и тогда формула (2) примет вид

$$J_i = \lg(K \cdot n_i / m_i). \quad (3)$$

Следовательно, надежность расчета информативности признаков зависит от того, насколько полно площади их влияния (n_i и m_i) изучены детальными поисково-разведочными работами.

Для нашей площади $K = M/N = 575/46 = 12,5$. Формула (3) –

$$J_i = \lg(12,5 n_i / m_i).$$

Суммарная информативность ЭУ определяется как алгебраическая сумма информативностей всех геологических признаков, в контуры которых попадает данный ЭУ:

$$J_j = \sum J_i, \quad (4)$$

где j – номер ЭУ; i – индекс признака, в площадь влияния которого попадает этот ЭУ.

По результатам расчетов составлены графики распределения рудных и безрудных участков по значениям их суммарной информативности (рис. 4), которые позволяют определить граничное значение суммарной информативности 0,2, с одной стороны от нее располагаются преимущественно рудные, а с другой – безрудные участки.

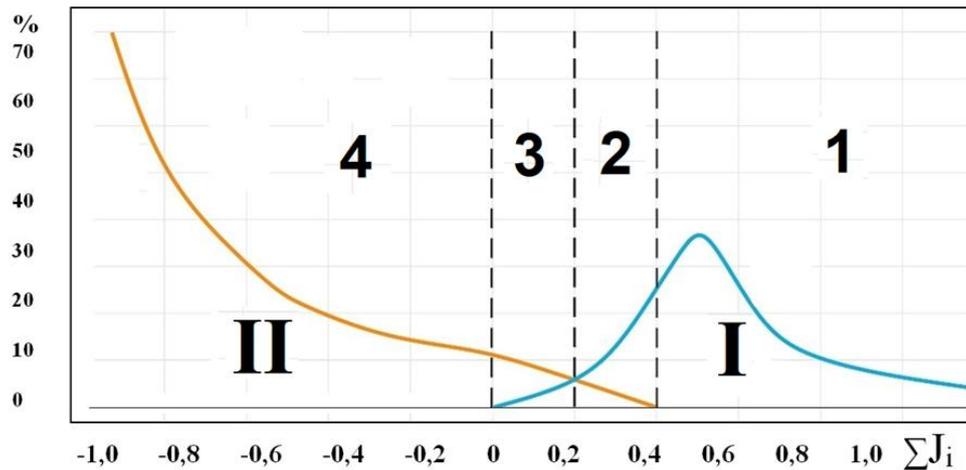


Рис. 4. Диаграммы расположения элементарных участков (I – рудных, II – безрудных) относительно их суммарной информативности
Арабские цифры – степень перспективности участков: 1 – участки с высокой перспективностью; 2 – участки со средней перспективностью; 3 – участки с низкой перспективностью; 4 – бесперспективные участки

Fig. 4. Location diagrams of elementary sites (I – ore, II – blank) regarding their total informativeness
Arabic numerals – prospect degree of sites: 1 – highly promising sites; 2 – sites with average prospects; 3 – sites with low prospects; 4 – unpromising sites

Граничное значение соответствует абсциссе точки пересечения кривых распределения рудных и безрудных ЭУ и разделяет кривые и прогнозируемую площадь на относительно перспективные и бесперспективные на нефрит части. В перспективной части кривых распределения могут быть выделены интервалы информативностей, соответствующие перспективности I, II и т. д. очереди.

Соответственно найденным значениям этих интервалов на карте, где в центрах ЭУ обозначена их суммарная информативность, проводятся линии равных перспектив. Составленная таким образом карта может быть отнесена к категории прогнозных (рис. 5). Она может служить основой для подсчета прогнозных ресурсов и выделения участков для постановки поисковых работ с поверхности и на глубине.

Как видно на рис. 5, первоочередные участки для поисков нефрита совпадают с областями пересечения разломов и их зон влияния, которые явля-

ются наиболее информативными признаками нефритоносности.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования по локальному прогнозированию на основе использования косвенных поисковых признаков с количественной оценкой их информативности даже на ограниченном объеме исходных геологических данных позволили провести районирование изученной территории по степени перспективности и выделить участки для постановки первоочередных поисковых работ на нефрит.

Более детальное рассмотрение этого вопроса возможно при условии получения дополнительных геологических материалов. Для этого необходимо дополнительное изучение геологического строения территории нефритоносного Голубинско-Олломинского поля. В комплекс этих работ целесообразно включить изучение стратиграфии разреза перспективной свиты с целью детального стратиграфического расчленения, подробное изучения ее структурной

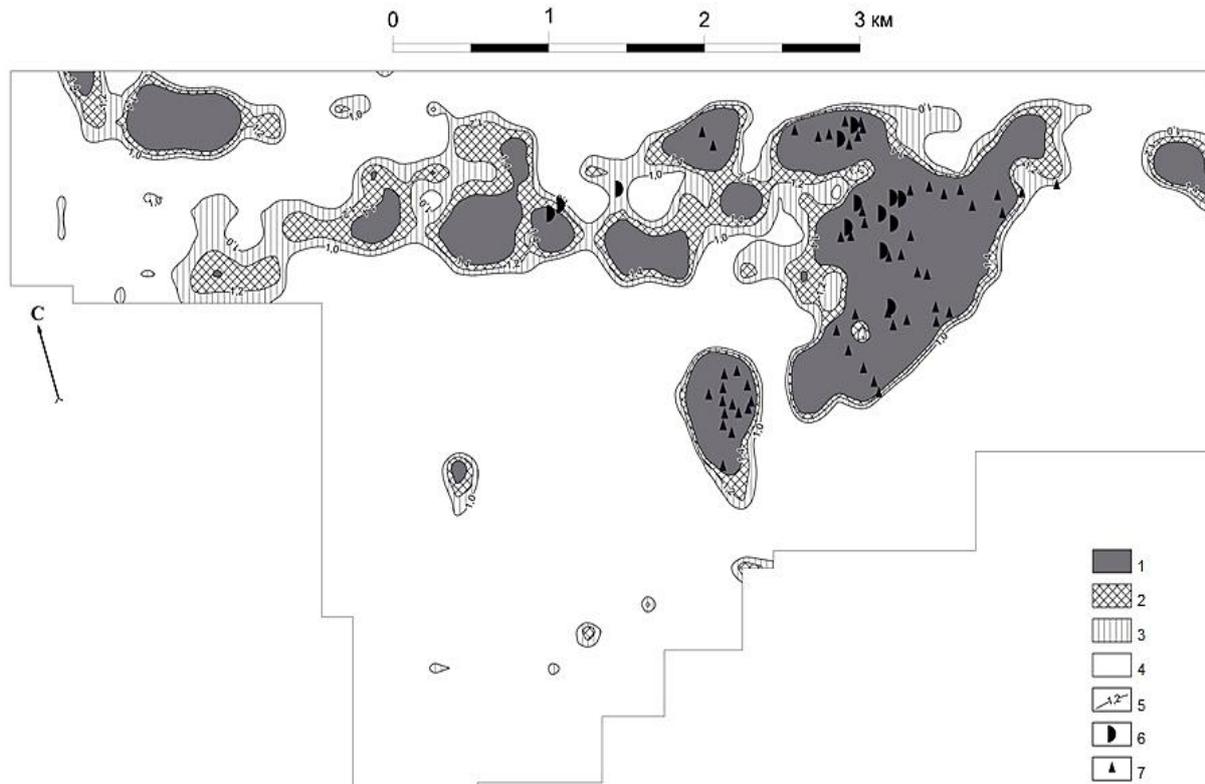


Рис. 5. Многофакторная прогнозная карта нефритоносности Голубинско-Олломинского поля:
1 – участки с высокой перспективностью на нефрит; 2 – участки со средней перспективностью на нефрит; 3 – участки с низкой перспективностью на нефрит; 4 – участки, неперспективные на нефрит; 5 – линии изоперспектив на нефрит; 6 – залежь нефрита; 7 – находки нефрита в делювии

Fig. 5. Multifactorial forecast map of nephrite mineralization of Golyubinsko-Ollominskoe field:
1 – areas highly promising for nephrite; 2 – areas with average prospect for nephrite;
3 – areas with low prospect for nephrite; 4 – areas unpromising for nephrite; 5 – line of nephrite isoprospectives; 6 – nephrite deposits; 7 – nephrite finds in deluvium

обстановки, проведение крупномасштабного картирования минералогии и петрографии всех выявленных метасо-

матических образований и ранее установленных фаций магматогенных комплексов территории.

Библиографический список

1. Кочнев А.П., Краснов Д.А. Факторы нефритоносности Голубинско-Олломинского нефритоносного поля (Республика Бурятия) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 1. С. 52–65.

2. Бурцева М.В., Рипп Г.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е. Нефриты Восточной Сибири: геохимические особен-

ности и проблемы генезиса // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 3. С. 516–527.

3. Замалетдинов Р.С. Методика поисков и разведки месторождений нефрита // Разведка и охрана недр. 1975. № 7. С. 18–24.

4. Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. Месторождения нефритов / отв. ред. И.С. Ломоносов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. 377 с.

5. Shere R.L. Geology of the Sagecreek nephrite deposit // Wyoming: Contri-

butions to Geology (University of Wyoming). 1972. Vol. 11. № 2. P. 83–86.

6. Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade: Occurrence and metasomatic origin // Extended abstract from International Geological Congress 2000. 2001. P. 7–10.

7. Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: metasomatic connections // International Geology Review. 2005. Vol. 47. P. 113–146.

8. Cooper A.F. Nephrite and metagabbro in the Haast Schist at Muddy Creek, Northwest Otago, New Zealand // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. 1995. Vol. 38. P. 325–332.

9. Кочнев А.П. Особенности локального прогнозирования твердых полезных ископаемых // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных

наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 1 (54). С. 33–44.

10. Кочнев А.П., Юренков Е.Г. Основы типизации прогнозно-поисковых моделей // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 1 (44). С. 74–80.

11. Бугаец А.Н., Дуденко Л.Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Л.: Недра, 1976. 270 с.

12. Высокоостровская Е.Б., Зеленецкий Д.С. О количественной оценке перспектив территории при поисках месторождений рудных полезных ископаемых // Советская геология. 1968. № 8. С. 58–71.

References

1. Kochnev A.P., Krasnov D.A. Nephrite-bearing factors of Golyubinskoe-Ollaminskoe nephrite-bearing field (Buryat Republic). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2017, vol. 40, no. 1, pp. 52–65. (In Russian).

2. Burtseva M.V., Ripp G.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. Nephritis of East Siberia: geochemical features and problems of genesis. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2015, vol. 56, no. 3, pp. 516–527. (In Russian).

3. Zamaletdinov R.S. Methods of nephrite deposit prospecting and exploration. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources], 1975, no. 7, pp. 18–24. (In Russian).

4. Sutorin A.N., Zamaletdinov R.S., Sekerina N.V. *Mestorozhdeniya nefritov* [Nephrite deposits]. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2015, 377 p. (In Russian).

5. Shere R.L. Geology of the Sagecreek nephrite deposit. Wyoming: Contributions to Geology (University of Wyoming), 1972, vol. 11, no. 2, pp. 83–86.

6. Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade: Occurrence and metasomatic origin. Extended abstract from International Geological Congress 2000, 2001, pp. 7–10.

7. Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: metasomatic connections. *International Geology Review*, 2005, vol. 47, pp. 113–146.

8. Cooper A.F. Nephrite and metagabbro in the Haast Schist at Muddy Creek, Northwest Otago, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1995, vol. 38, pp. 325–332.

9. Kochnev A.P. Features of solid minerals local prediction. *Izvestiya Sibir-*

skogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 1 (54), pp. 33–44. (In Russian).

10. Kochnev A.P., Yurenkov E.G. Fundamentals of forecasting and prospecting models typification. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian

Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 1 (44), pp. 74–80. (In Russian).

11. Bugaets A.N., Dudenko L.N. *Matematicheskie metody pri prognozirovanii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Mathematical methods under prediction of mineral deposits]. Leningrad: Nedra Publ., 1976, 270 p. (In Russian).

12. Vysokoostrovskaya E.B., Zelenskii D.S. On quantitative assessment of the area prospects when searching for mineral deposits. *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology], 1968, no. 8, pp. 58–71. (In Russian).

Критерии авторства

Кочнев А.П., Краснов Д.А, Иванова Р.Н. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kochnev A.P., Krasnov D.A, Ivanova R.N. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-67-78>

РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

© В.С. Канайкин^а, Е.Х. Турутанов^б, Б. Буянтогтох^с

^аИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

^бИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^сИнститут астрономии и геофизики МАН,
13343, Монголия, г. Улан-Батор, ул. Ж. Лхагаасурэнгийн, 42.

РЕЗЮМЕ: Цель данной статьи заключается в исследовании возможностей методов математической статистики при количественной интерпретации гравитационных аномалий. В работе использованы дисперсионный и регрессионный методы математического анализа для трансформации и инверсии гравитационного поля на примере Богдоулинского гранитоидного массива (Монголия) с аномально высоким содержанием редких и цветных металлов (олово, цинк, вольфрам). В результате получены количественные характеристики мощности массива и данные о морфологических особенностях его формы. Максимальная мощность гранитоидов составляет 12 км. Полученные оценки подтверждаются результатами решения обратной задачи гравиметрии с помощью метода подбора моделей. Таким образом, применение методов математической статистики для определения морфологии интрузивных тел позволяет получать петрофизические модели геологических объектов, совпадающие с результатами количественной интерпретации, выполненной с помощью программы полуавтоматической 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля.

Ключевые слова: аномалия, инверсия, гранитоиды, статистический анализ, петрофизическая модель

Информация о статье: Дата поступления 24 октября 2018 г.; дата принятия к печати 27 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Решение обратных задач гравиметрии с помощью методов математической статистики. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):67–78. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-67-78.

^аКанайкин Виктор Степанович, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования, e-mail: kanvs@yandex.ru

Viktor S. Kanaikin, Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsoil Use, e-mail: kanvs@yandex.ru

^бТурутанов Евгений Хрисанфович, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией комплексной геофизики, тел.: 8 (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

Evgeny Kh. Turutanov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Complex Geophysics, tel.: 8 (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

^сБуянтогтох Базарин, аспирант, научный сотрудник, тел.: 8 (97611) 458024, e-mail: bazaryn_b@yahoo.com
Buyantogtokh Bazarin, Postgraduate, Scientific Researcher, tel.: 8 (97611) 458024, e-mail: bazaryn_b@yahoo.com

SOLVING INVERSE PROBLEMS OF GRAVIMETRY BY MATHEMATICAL STATISTICS METHODS

© Viktor S. Kanaikin^a, Evgeny Kh. Turutanov^b, Bazarin Buyantogtokh^c

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^bInstitute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

^cInstitute of Astronomy and Geophysics MAS,
42 J. Lhagaasurengiin, Ulaanbaator 13343, Mongolia

ABSTRACT: The purpose of this article is to study the possibilities of mathematical statistics methods under the quantitative interpretation of gravity anomalies. The study uses dispersion and regression methods of mathematical analysis for gravitation field transformation and inversion on example of the Bogdoulin granitoid massif (Mongolia) with the abnormally high content of rare and non-ferrous metals (Sn, Zn, W). As a result, quantitative characteristics of the massif thickness have been obtained as well as the data on the morphological features of its shape. The maximum thickness of granitoids is 12 km. The obtained estimates are confirmed by the results of solving the inverse problem of gravimetry by the method of model selection. Therefore, the application of methods of mathematical statistics for determining intrusive body morphology allows to obtain petrophysical models of geological objects coinciding with the results of quantitative interpretation performed with the use of the program of semi-automatic 3D-Markquardt-inversion of the gravitational field.

Keywords: anomaly, inversion, granitoids, statistical analysis, petrophysical model

Information about the article: Received October 24, 2018; accepted for publication November 27, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kanaikin V.S., Turutanov E.H., Buyantogtokh B. Solving inverse problems of gravimetry by mathematical statistics methods. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):67–78 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-67-78.

Введение

Количественная интерпретация гравитационных данных предполагает использование различных способов обработки исходных материалов. В частности, при интерпретации потенциальных геофизических полей вполне возможно применение методов регрессионного и дисперсионного анализов. Эффективность применения этих методов для количественной интерпретации гравитационных данных зависит от сложности геологического строения изучаемого района, то есть и от структуры гравитационного поля [1, 2].

В работе рассматриваются возможности использования аппарата дисперсионного и регрессионного анализов математической статистики для транс-

формации и инверсии гравитационного поля Богдоулинского гранитного массива (Монголия) с целью оценки особенностей его формы и размеров, поскольку эти данные могут быть использованы при инженерно-сейсмологических работах по уточнению сейсмической опасности отдельных участков города Улан-Батора [3, 4]. Кроме того, породы массива обладают аномально высоким содержанием редких и цветных металлов (олово, цинк, вольфрам). Следовательно, изучение геологического строения этого объекта вызывает закономерный интерес не только с научной, но и с практической точки зрения.

Методы исследования

Горстовая блоковая структура массива Богдоул расположена в централь-

ной части Хэнтэйского свода Монголо-Забайкальской (Хангай-Хэнтэйской) складчатой системы Монголии [5]. Столь крупная плотностная неоднородность может оказать заметное влияние на уровень сейсмичности района [6], поэтому изучение формы и размеров Богдоулинского гранитного массива, глубинная геометрия которого до сих пор плохо изучена, представляет собой актуальную задачу.

Для изучения морфологии Богдоулинского массива авторами проведена крупномасштабная гравиметрическая съемка масштаба 1:100000. Работы выполнены с помощью гравиметров CG-5 по стандартной методике [4]. Высоты пунктов наблюдения определялись приборами Trimble 5700 GPS. Площадь гравиметрической съемки составила 1150 км². Выставлено 178 координатных пунктов наблюдения. Точность гравиметрических наблюдений рядовых координатных пунктов равна $\pm 0,02$ мГал, точность определения высот на них составила $\pm 0,35$ м, точность вычисления аномалии Буге –

$\pm 0,073$ мГал. Поправка на гравитационное влияние рельефа учтена в радиусе 200 км. По результатам гравиметрической съемки авторами построена схема аномалий Буге (рис. 1).

Средняя плотность гранитоидов массива по данным результатов многочисленных денситометрических измерений [5, 7] составляет 2520 кг/м³. Вмещающие породы фундамента представлены в основном нижнекарбовыми и средневерхнедевонскими песчаниками, сланцами и алевритами. Величина плотности коренных пород с учетом подстилающих их гранитоидов принимается по источнику [5] и в среднем равна 2630 кг/м³.

Для исследования возможностей применимости математической статистики при интерпретации гравитационных аномалий от интрузивных тел использованы дисперсионный и регрессионный методы анализа с целью трансформации и инверсии гравитационного поля Богдоулинского гранитного массива.

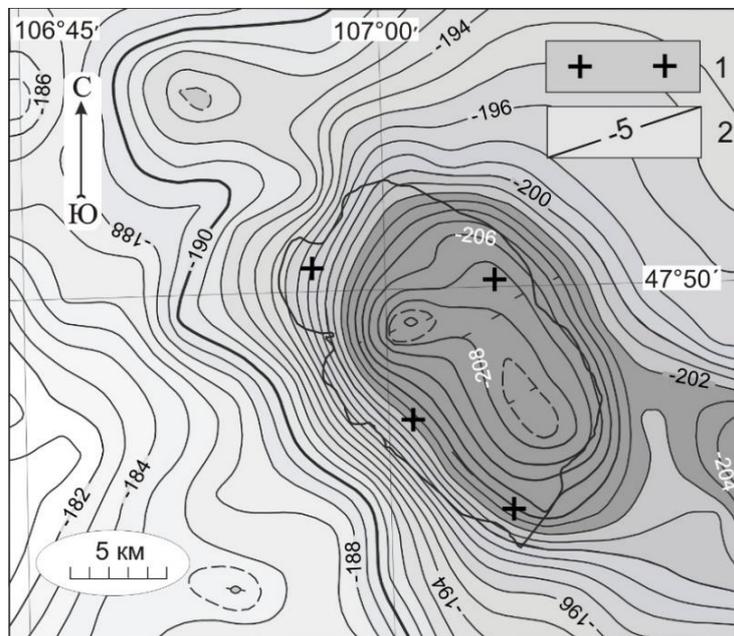


Рис. 1. Схема аномалий Буге Богдоулинского гранитного массива:
1 – выходы гранитов Богдоулинского массива; 2 – изоаномалы силы тяжести, мГал
Fig. 1. Diagram of the Bouguer anomalies of the Bogdoulin granite massif:
1 – manifestations of Bogdoulin massif granites; 2 – gravity isoanomalies, mGal

Региональный фон $\Delta G^{\text{фон}}$ и локальные (остаточные) аномалии силы тяжести $\Delta G^{\text{лок}}$ получены в результате использования метода главных компонент (principal component analysis – PCA) дисперсионного анализа. Именно эти компоненты характеризуют структуру и наибольшую дисперсию (энергию) гравитационного поля. С этой целью исходное поле аномалий силы тяжести оцифровано и представлено двумерным массивом ΔG в виде матрицы с размерностью $N \times M$, где первый множитель соответствует числу пикетов, а второй – количеству профилей наблюдения на исследуемом участке ($N = 25$; $M = 15$). На основе этого массива данных согласно источникам [1, 2, 8] рассчитана ковариационная матрица исходных данных, изучение внутренней структуры которой позволяет вычислить главные компоненты гравитационного поля и провести их физико-геологическое истолкование для установления главной причины (источника) существования аномального поля. Принято считать, что первая главная компонента,

как правило, связана с региональной составляющей поля силы тяжести [2].

Для выявления первой главной компоненты гравитационного поля рассчитаны осредненные величины энергетических сигналов фоновой (рис. 2, 4) и локальной (рис. 3, 4) его составляющих:

$$G_i^{\text{фон}} = \sum_i^N \sum_j^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}}{M};$$

$$G_i^{\text{лок}} = \sum_i^N \sum_j^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{лок}}}{M},$$

где i – номер пикета; j – номер профиля; N, M – количество пикетов и профилей соответственно; $\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}, \Delta g_{i,j}^{\text{лок}}$ – значения фонового и локального гравитационного поля на i -м пикете j -го профиля.

Из рис. 4, на котором представлены интенсивность и характер изменения региональной и локальной (остаточной) составляющих гравитационного поля, видно, что площадь, ограниченная графиком регионального фона и некой горизонтальной прямой, значительно меньше, чем подобная ей площадь,

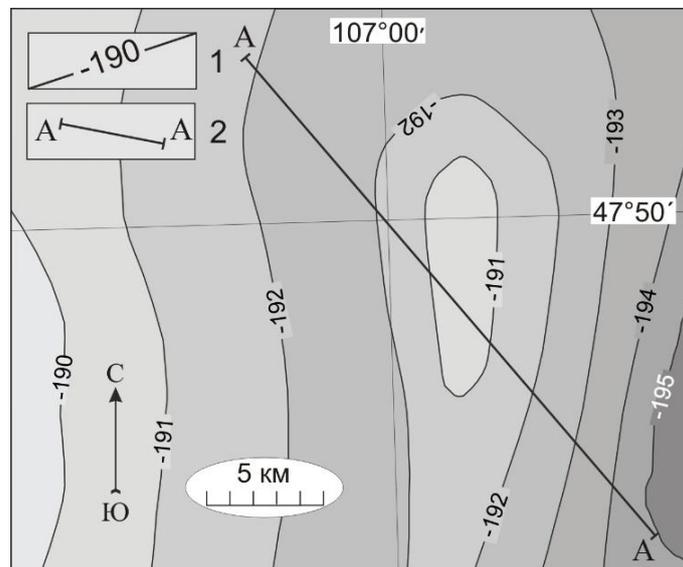


Рис. 2. Схема регионального фона гравитационного поля Богдоулинского гранитного массива $\Delta G^{\text{фон}}$:
1 – интерпретационный профиль; 2 – изоаномалы силы тяжести, мГал
Fig. 2. Diagram of the regional background of the Bogdoulin granite massif gravitation field $\Delta G^{\text{фон}}$:
1 – interpretation profile; 2 – gravity isoanomalies, mGal

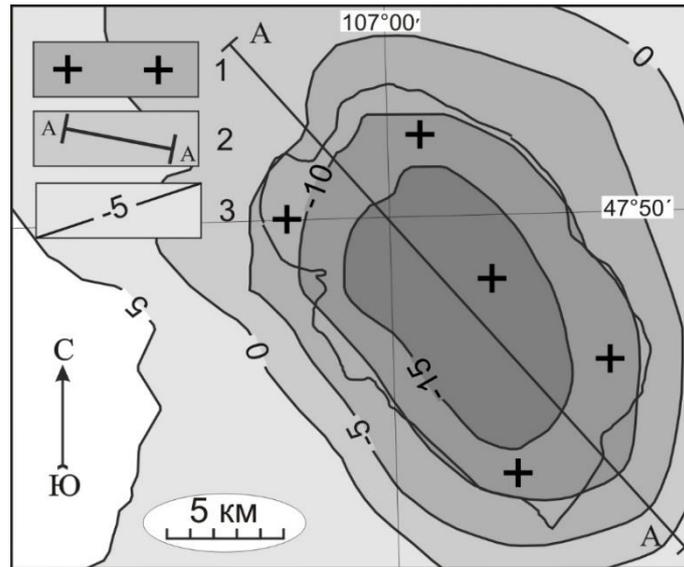


Рис. 3. Схема локальной (остаточной) аномалии Буге Богдоулинского гранитного массива $\Delta G^{лок}$:

1 – выходы гранитов Богдоулинского массива; 2 – интерпретационный профиль;
3 – изоаномалы силы тяжести, мГал

Fig. 3. Diagram of the local (residual) Bouguer anomaly of the Bogdoulin granite massif ΔG^{loc} :

1 – manifestations of the Bogdoulin massif granites; 2 – interpretation profile;
3 – gravity isoanomalies, mGal

ограниченная графиком локальной аномалий силы тяжести. Это однозначно свидетельствует о неравноценности вкладов двух составляющих в суммарную дисперсию (энергию) исходного гравитационного поля и позволяет утверждать, что первая главная компонента аномального поля связана с локальной составляющей, а не с региональным фоном. Установление такой зависимости решает основную проблему дисперсионного анализа: выявление факта того, что главным объектом интерпретации является сам гранитный массив, особенности его формы и размеров, а не совокупность плотностных неоднородностей земной коры района исследований.

С целью определения особенностей глубинного строения Богдоулинского массива вдоль интерпретационного

профиля А-А (см. рис. 3) согласно данным Г.С. Вахромеева и др.¹ сформирована петрофизическая модель. Протяженность выходов гранитного массива вдоль линии интерпретационного профиля А-А, проходящего через эпицентр гравитационной аномалии, составляет 25000–28000 м. Ширина выходов геологического тела изменяется в пределах 15000–18000 м, то есть исследуемый объект в плане имеет форму эллипса. Результаты количественной интерпретации, выполненной с помощью программы полуавтоматической 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля при аппроксимации тел ограниченными по простиранию горизонтальными призмами с вертикальными сечениями, имеющими форму многоугольников [9], позволяют считать, что вертикальная мощность массива

¹ Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канаikin В.С., Номоконова Г.Г. Петрофизика: учебник для вузов. Томск: Изд-во Томского университета, 1997. 460 с. / Vakhromeev G.S., Erofeev L.Ya., Kanaikin V.S., Nomokonova G.G. Petrophysics. Tomsk: Tomsk University Publ., 1997. 460 p.

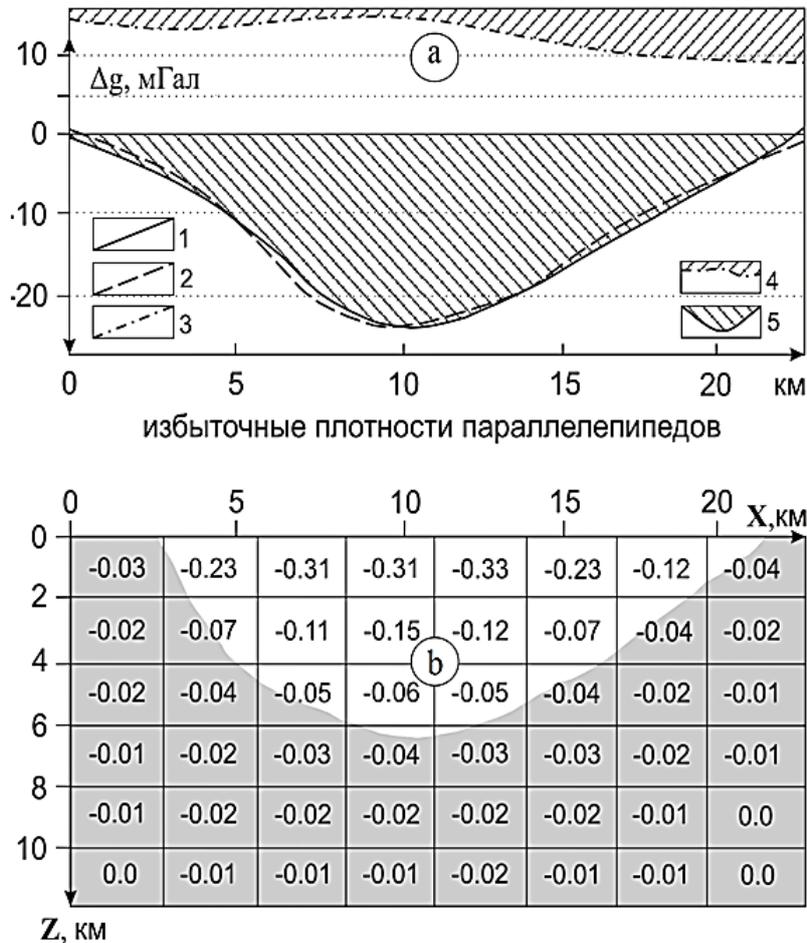


Рис. 4. Схема физико-геологической модели Богдоулинского гранитного массива вдоль интерпретационного профиля А-А:

а – составляющие гравитационного поля: 1 – график локальной аномалии $\Delta G^{лок}$, 2 – график модельного поля ΔG петрофизической модели, 3 – график регионального фона модели $\Delta G^{фон}$, 4 – «энергия» сигнала регионального фона, 5 – «энергия» сигнала остаточной гравитационной аномалии; б – петрофизическая модель гранитного массива

Fig. 4. Diagram of the physico-geological model of the Bogdoulin granite massif along the interpretation profile A-A:

а – gravitation field components: 1 – graph of the local anomaly $\Delta G^{лок}$, 2 – graph of the model field ΔG of the petrophysical model, 3 – graph of the regional background of the model $\Delta G^{фон}$, 4 – "energy" of the regional background signal, 5 – "energy" of the residual gravitational anomaly signal; б – petrophysical model of the granite massif

достигает 9000 м, а его форма близка к перевернутому эллиптическому конусу (клину).

Эти геометрические параметры приняты в качестве ограничений при формировании петрофизической модели массива, состоящей из набора прямоугольных параллелепипедов. Модель гранитного массива составлена из 48 прямоугольных параллелепипедов, расположенных в 6 слоях. Вертикальная

мощность этих тел $h = 2000$ м, горизонтальная мощность (длина) $d = 3000$ м (рис. 5). Клинообразная форма массива означает, что горизонтальные размеры параллелепипедов $2b$ (ширина) не являются постоянными – их величина изменяется в зависимости от положения параллелепипеда на профиле (центральная или периферийная часть профиля) и от глубины его залегания.

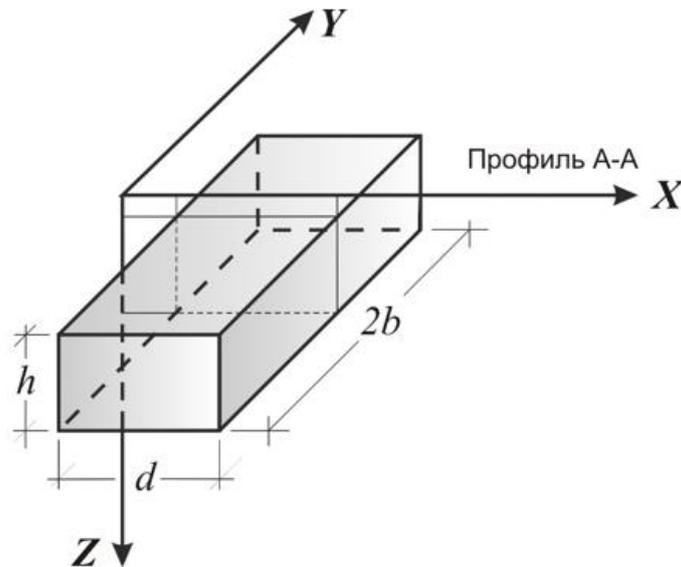


Рис. 5. Положение параллелепипедов и их геометрические параметры относительно интерпретационного профиля А-А
Fig. 5. Position of parallelepipeds and their geometrical parameters relative to the interpretation profile A-A

Инверсия гравитационного поля осуществлялась с помощью регрессионного метода математического анализа способом наименьших квадратов с применением сингулярного разложения матриц. Расчеты выполнены с помощью математического пакета MathCad с использованием подпрограмм сингулярного разложения матриц SVD [10].

Рассмотрим расчеты по интерпретационному профилю А-А, проходящему через эпицентрально-аномальную зону исследуемого района (см. рис. 3). Для этого профиля сформирована линейная математическая модель в виде системы уравнений $\Delta G^{лок} \approx B \cdot \bar{a}$, где B – матрица плана размерностью $n \times k$; $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ – вектор-столбец определяемых коэффициентов (в нашем случае это значение избыточных плотностей параллелепипедов); n – количество пикетов на интерпретационном профиле; k – число аномалиеобразующих объектов (параллелепипедов), которыми аппроксимируется изучаемый геологический объект. Для вычисления коэффициентов $b_{i,j}$ матрицы плана B используется формула для расчета

гравитационного поля от прямоугольного параллелепипеда. Поэтому элементами этой матрицы являются значения базисных функций $b_{i,j}$, которые соответствуют эффекту j -го прямоугольного параллелепипеда ($j = 1, \dots, k$) в i -й точке профиля ($i = 1, \dots, n$), причем избыточная плотность такой призмы принята равной 1 г/см^3 .

Для вычисления коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ использован алгоритм, основанный на применении сингулярного разложения матрицы [1,10]. Сингулярное разложение позволяет выбирать решения с учетом реальной точности вычислений и исходных данных путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам, то есть числам меньше заданной точности наблюдений гравитационного поля.

Необходимо отметить, что указанный способ вычислений не позволил решить обратную задачу гравиметрии с требуемой точностью за одну «итерацию». То есть расхождение геометрических параметров модели массива, полученных в результате решения обратной задачи способом наименьших квадратов

с применением сингулярного разложения матриц, с результатами, полученными с помощью 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля, слишком велико. Причина подобного расхождения заключается в том, что при интерпретации с помощью регрессионного анализа верхние горизонты (слои) модели принимают большую отрицательную избыточную плотность. Например, в отдельных параллелепипедах верхней части модели массива она достигает $-0,30 \dots -0,35 \text{ г/см}^3$, что ведет к значительному уменьшению вертикальной мощности геологического тела (см. рис. 4). В связи с этим в данном варианте решения обратной задачи вертикальная мощность гранитного массива не превышает 6000 м. Однако реальная избыточная плотность гранитов, вычисленная по данным результатов многочисленных денситометрических измерений, находится в интервале $-0,1 \dots -0,12 \text{ г/см}^3$ [5, 7], что существенно увеличивает вертикальные размеры тела по сравнению с полученными. Вследствие этого дальнейшее решение обратной задачи было проведено методом подбора моделей, при котором на «избыточную» плотность гранитов было наложено ограничение: она не могла принимать значения менее $-0,12 \text{ г/см}^3$. С помощью варьирования «избыточной» плотностью, горизонтальными размерами (шириной) и глубиной залегания параллелепипедов нами реализовано большое количество вариантов решений прямой задачи гравиметрии. При вычислении гравитационного эффекта от прямоугольных параллелепипедов их «избыточная» плотность задавалась от 0,0 до $-0,12 \text{ г/см}^3$, ширина изменялась от 0 до 15000 м, глубина верхней кромки принимала значения от 0 до 10000 м.

В результате расчетов получены вполне удовлетворительные решения с приемлемой точностью. Среднеквадратическая невязка между локальным и модельным полем сопоставима с общей

точностью гравиметрической съемки: $\sigma \approx \pm 0,09 \text{ мГал}$. Под модельным полем в данном случае понимается результат решения прямой задачи гравиметрии для петрофизической модели с заданными геометрическими и амплитудными параметрами (избыточная плотность параллелепипедов).

Результаты интерпретации гравиметрических данных

Схематический разрез итоговой петрофизической модели Богдоулинского гранитного массива приведен на рис. 6. Геометрические размеры параллелепипедов и величины их избыточной плотности, обеспечивающие наилучшую сходимость остаточной (локальной) аномалии и модельного поля силы тяжести, приведены в табл. 1 и 2.

Судя по результатам интерпретации, Богдоулинский массив имеет сложное «клавишное» строение и представлен блоками, направления простирания которых совпадают с направлениями простирания разрывных нарушений, ограничивающих плутон. Длинная ось овала, которому подобны геологические выходы этого тела, имеет северо-западную ориентировку и совпадает с направлением глубинных разломов, которые ограничивают Богдоулинский массив с юго-запада и северо-востока. Максимальная мощность гранитов составляет 12 км (см. рис. 6, табл. 1, 2), однако интерпретация гравитационного поля с использованием полуавтоматической маркварт-инверсии оценивает эту величину в 9 км. Для интрузивных тел подобных размеров расхождение не велико, но и оно требует объяснения. Сравнивая графики регионального фона, построенные на основе метода PCA и используемые при интерпретации с помощью 3D-инверсии (см. рис. 4), можно сделать следующий вывод. При линейном графическом снятии регионального фона концы интерпретационного профиля не вышли в зоны, свободные от гравитационного влияния

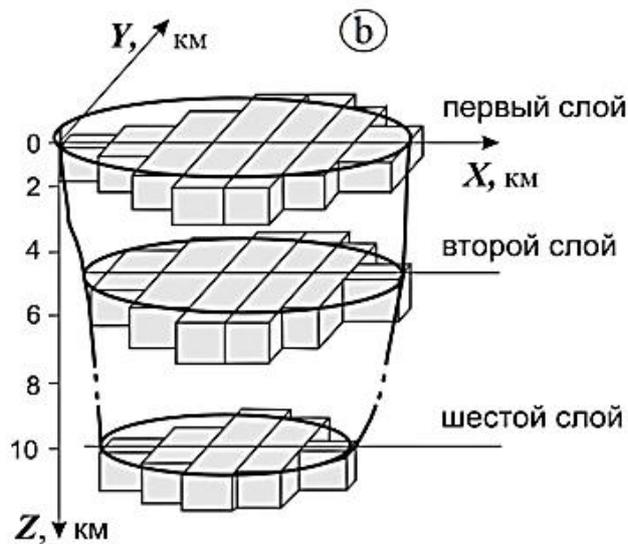
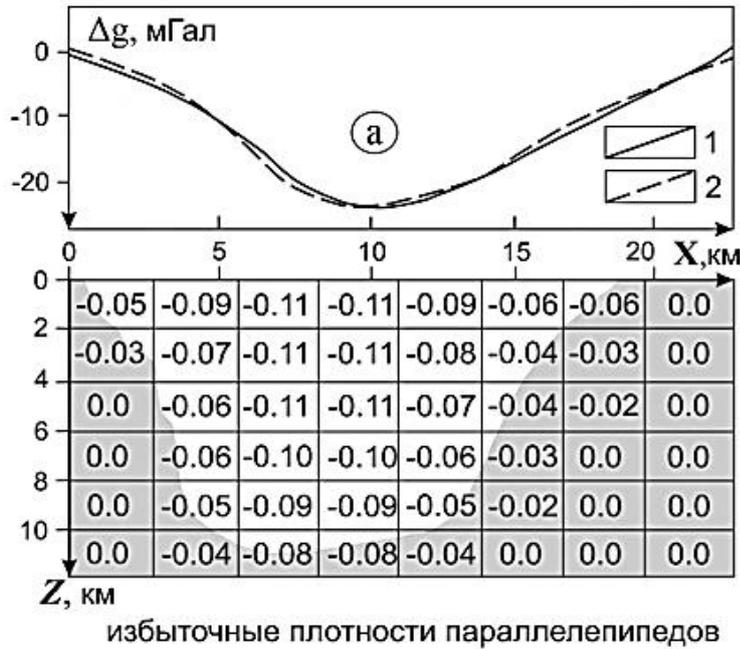


Рис. 6. Схема петроплотностной модели Богдоулинского гранитного массива:
а – модель в плоскости интерпретационного разреза А-А: 1 – график локальной аномалии $\Delta G^{лок}$,
2 – график модельного поля ΔG петрофизической модели; б – модель, отражающая
объемное распределение аномалиеобразующих параллелепипедов

Fig. 6. Diagram of the petro-density model of the Bogdoulin granite massif:
а – model in the plane of the interpretation section A-A: 1 – graph of the local anomaly $\Delta G^{лок}$,
2 – graph of the model field ΔG of the petrophysical model; б – model
reflecting the volume distribution of the anomaly forming parallelepipeds

гранитов, что привело к уменьшению амплитуды локальной (остаточной) аномалии и в конечном итоге к снижению мощности массива. Поскольку снятие регионального фона графическим способом в большой степени зависит от квалифика-

ции интерпретатора, то есть является субъективным, использование аппарата математической статистики при решении обратной задачи гравиметрии может быть полезным инструментом трансформации и инверсии поля силы тяжести.

Таблица 1

Значения избыточной плотности параллелепипедов

Table 1

Values of parallelepiped excess density

Глубина, км	Номер слоя	Номер параллелепипеда в слое							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Избыточная плотность параллелепипедов, г/см ³							
0	1	-0,05	-0,09	-0,11	-0,11	-0,09	-0,06	-0,05	0,0
2	2	-0,03	-0,07	-0,11	-0,11	-0,08	-0,04	-0,03	0,0
4	3	0,0	-0,06	-0,11	-0,11	-0,07	-0,04	-0,01	0,0
6	4	0,0	-0,06	-0,10	-0,10	-0,06	-0,03	0,0	0,0
8	5	0,0	-0,05	-0,09	-0,09	-0,05	-0,02	0,0	0,0
10	6	0,0	-0,04	-0,08	-0,08	-0,04	-0,01	0,0	0,0

Таблица 2

Глубина залегания верхней кромки и размеры параллелепипедов

Table 2

Depth of the upper edge and parallelepipeds' dimensions

Глубина, км	Номер слоя	Номер параллелепипеда в слое							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Ширина параллелепипедов 2b, м							
0	1	1000	4000	9000	15000	13000	8000	4000	0
2	2	600	3000	7000	11000	10000	7000	2000	0
4	3	0	2600	6000	9000	9000	6000	1200	0
6	4	0	1800	5000	7000	7000	5000	0	0
8	5	0	1000	4000	5000	5000	3600	0	0
10	6	0	600	2000	3000	3000	400	0	0

Выводы

При интерпретации потенциальных геофизических полей, в частности для трансформации и инверсии поля силы тяжести, вполне возможно применение методов регрессионного и дисперсионного анализов математической статистики. На примере рудоносного гранитного массива Богдоул, расположенного в Восточной Монголии, авторами показана эффективность использования метода главных компонент (РСА) дисперсионного анализа и метода наименьших квадратов с применением сингулярного разложения матриц регрессионного анализа

для установления главного источника гравитационной аномалии (гранитный массив) и выявления особенностей его формы и размеров. Геометрические параметры итоговой модели гранитного массива подтверждены результатами количественной интерпретации, выполненной с помощью программы полуавтоматической 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля при аппроксимации тел ограниченными по простиранию горизонтальными призмами с вертикальными сечениями, имеющими форму многоугольников.

Библиографический список

1. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных: монография / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 600 с.
2. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 337 с.
3. Геология Монгольской Народной Республики. Т. III. Полезные ископаемые / под ред. Н.А. Маринова, Р.А. Хасина, Ч. Хурц. М.: Недра, 1977. 703 с.
4. Турутанов Е.Х. Морфология мезозойских гранитных плутонов Монголии по гравиметрическим данным. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2012. 223 с.
5. Дугараа П., Арвисбаатар Н. Петроплотностная характеристика пород Жанчивланского рудного узла и его окрестностей // Вопросы геологии и полезных ископаемых Центральной и Восточной Монголии. Уланбаатар: Изд-во МонГУ, 1982. С. 11–13.
6. Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.
7. Вахромеев Г.С. К вопросу формирования физико-геологических моделей месторождений полезных ископаемых Монгольской Народной Республики // Вопросы геологии и металлогении Восточной Монголии. Уланбаатар: Изд-во МонГУ, 1979. С. 236–244.
8. Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Применение регрессионного и дисперсионного анализов для интерпретации гравиметрических данных // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 115–125.
9. Webring M. Semi-automatic Marquardt inversion of gravity and magnetic profiles // U.S. Geological Survey Open-File Report OF 85-122.
10. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.

References

1. Devis Dzh. Statistics and data analysis in geology, 1977, 600 p. (Russ. ed.: Devis Dzh. *Statistika i analiz geologicheskikh dannykh*. Moscow: Mir Publ., 600 p.).
2. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii* [Theoretical principles of geophysical information processing]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 337 p. (In Russian).
3. Marinov N.A., Khasin R.A., Khurts Ch. *Geologiya Mongol'skoi Narodnoi Respubliki* [Geology of the Mongolian People's Republic]. Vol. III. *Poleznye iskopaemye* [Mineral Resources]. Moscow: Nedra Publ., 1977, 703 p. (In Russian).
4. Turutanov E.Kh. *Morfologiya mezo-zoiskikh granitnykh plutonov Mongolii po gravimetricheskim dannym* [Morphology of Mongolian Mesozoic granite plutons according to gravimetric data]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2012, 223 p. (In Russian).
5. Dugaraa P., Arvisbaatar N. *Petroplotnostnaya kharakteristika porod Zhanchivlanskogo rudnogo uzla i ego okrestnostei* [Petro-density characteristics of rocks of the Zhanchivlansky ore cluster and its environs]. *Voprosy geologii i poleznykh iskopaemykh Tsentral'noi i Vostochnoi Mongolii* [Problems of Geology and Minerals in Central and Eastern Mongolia]. Ulanbaatar: National University of Mongolia Publ., 1982, pp. 11–13. (In Russian).
6. Dzhurik V.I., Klyuchevskii A.V., Serebrennikov S.P., Dem'yanovich V.M., Batsaikhan Ts., Bayaraa G. *Seismichnost' i*

raionirovanie seismicheskoi opasnosti territorii Mongolii [Seismicity and seismic hazard zoning of Mongolian territory]. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS Publ., 2009, 420 p. (In Russian).

7. Vakhromeev G.S. *K voprosu formirovaniya fiziko-geologicheskikh modelei mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh Mongol'skoi Narodnoi Respubliki* [On formation of physico-geological models of mineral deposits of the Mongolian People's Republic]. *Voprosy geologii i metallogenii Vostochnoi Mongolii* [Problems of Geology and Metallogeny of Eastern Mongolia]. Ulanbaatar: National University of Mongolia Publ., 1979, pp. 236–244. (In Russian).

8. Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. Application of regression and variance analyses for gravimetry data

interpretation. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2018, vol. 41, no. 1, pp. 115–125. (In Russian).

9. Webring M. Semi-automatic Marquardt inversion of gravity and magnetic profiles // U.S. Geological Survey Open-File Report OF 85-122.

10. Forsait Dzh., Mal'kol'm M., Mouler K. Machine methods of mathematical calculations, 1980, 280 p. (Russ. ed.: *Mashinnye metody matematicheskii vychislenii*. Moscow: Mir Publ., 1980, 280 p.).

Критерии авторства

Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.379

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-79-88>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ЗЕЕ-БУРЕЙНСКОМ БАССЕЙНЕ

© В.А. Кочукова^а, А.М. Пашевин^б

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

^{а,б}Обособленное подразделение АО «Росгеология» «Иркутское геофизическое подразделение», 664039, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а.

РЕЗЮМЕ: Исследования были направлены на выделение структурно-тектонических особенностей Зее-Буреинской депрессии по комплексу геофизических методов электроразведки и сейсморазведки при поисках месторождений полезных ископаемых. На этапе качественного анализа электроразведочных данных построены дифференциальные разрезы сопротивления с использованием методики «проводящей плоскости». Выполнено комплексирование электроразведочных и сейсморазведочных данных. При поисках углеводородов на территории Амурской области (Зее-Буреинский бассейн) по результатам комплексной интерпретации электроразведки и сейсморазведки были обнаружены вулканические аппараты, которые могли существенно повлиять на катагенез органического вещества осадочных пород, а также на сохранность ловушек углеводородов. Таким образом, применение комплексирования геофизических методов на этапе качественного анализа позволяет уверенно картировать тектонические структуры различного порядка.

Ключевые слова: электроразведка, электромагнитные исследования, метод зондирования становлением поля в ближней зоне, продольное сопротивление, сейсморазведка, сейсмогеоэлектрический разрез, вулканические аппараты, Зее-Буреинский бассейн

Информация о статье: Дата поступления 8 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 13 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Кочукова В.А., Пашевин А.М. Эффективность применения комплекса геофизических методов при выделении вулcano-тектонических структур в Зее-Буреинском бассейне. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):79–88. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-79-88.

^аКочукова Вероника Алексеевна, аспирант кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, ведущий геофизик обособленного подразделения АО «Росгеология» «Иркутское геофизическое подразделение», e-mail: nikamor@mail.ru

Veronika A. Kochukova, Postgraduate of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsurface Reserve Management of Irkutsk National Research Technical University, Leading Geophysicist of the separate division of JSC Rosgeologiya Irkutsk Geophysical Division, e-mail: nikamor@mail.ru

^бПашевин Александр Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, e-mail: ampashev@yandex.ru
Alexander M. Pashevin, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Geophysicist, e-mail: ampashev@yandex.ru

EFFICIENCY OF A COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS IN THE ALLOCATION OF VOLCANO-TECTONIC STRUCTURE IN THE ZEYA-BUREYA BASIN

© Veronika A. Kochukova^a, Alexander M. Pashevin^b

^aIrkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation.

^{a,b}Separate division of the Joint-Stock Company "Rosgeologiya" of Irkutsk Geophysical Division,
9a, Klary Tsetkin St., Irkutsk 664039, Russian Federation

ABSTRACT: The research is aimed at the identification of the structural and tectonic features of the Zeya-Bureya depression by a set of geophysical methods of electrical prospecting and seismic measurements under mineral deposit exploration. The differential sections of resistance were built at the stage of quality analysis of the electro-prospecting data using the method of "conducting plane". The data of electrical prospecting and seismic measurements were integrated. The results of integrated interpretation of seismic measurements and electrical prospecting data under the search for hydrocarbons on the territory of the Amur region (Zeya-Bureya basin) allowed to discover volcanic edifices, which could have a significant effect both on the catagenesis of organic matter of sedimentary rocks and the preservation of hydrocarbon traps. Therefore, the integration of geophysical methods at the stage of qualitative analysis allows reliable mapping of the tectonic structures of different order.

Keywords: electrical prospecting, electromagnetic studies, TEM sounding in the near field, longitudinal resistance, seismic measurements, seismo-geoelectric section, volcanic edifices, Zeya-Bureya basin

Information about the article: Received November 8, 2018; accepted for publication December 13, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kochukova V.A., Pashevin A.M. Efficiency of a complex of geophysical methods in the allocation of volcano-tectonic structure in the Zeya-Bureya basin. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):79–88 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-79-88.

Введение

Зее-Буреинский бассейн расположен в южной части Амурской области и входит в состав Восточно-Азиатского нефтегазоносного пояса, в строении которого проявляется закономерность: бассейны центральной части (Сунляо, Бохайвань) крупные и глубокие, наиболее богатые нефтью, периферийные (Зее-Буреинский, Джаньхань) уступают им по площади и мощности осадочной толщи [1]. Все впадины Китайской части пояса, даже мелкие, нефтегазоносны [2]. С этой точки зрения можно положительно оценить перспективность Зее-Буреинской депрессии на углеводороды [3].

Изучение Зее-Буреинского бассейна геофизическими методами началось в 60-е годы прошлого столетия, и на данный момент построены карты мощно-

сти осадочного чехла, структурная схема поверхности фундамента [4–7].

Геолого-геофизическое строение Зее-Буреинского бассейна

В строении разреза Зее-Буреинской впадины (Зее-Буреинский бассейн) принимают участие отложения различного возраста. Палеозойские породы слагают разрез кристаллического фундамента, а мезозойские и кайнозойские отложения представляют осадочный чехол впадины. Породы палеозойского возраста изучены в обнажениях горного обрамления впадины в процессе геологосъемочных работ, выполненных В.И. Макаровым, А.П. Сорокиным, Н.К. Осиповой, В.Н. Гончаровым и др. Разрез осадочного чехла вскрыт глубокими и структурными скважинами. Стратификация осадочного чехла Зее-Буреинской

впадины выполнена на основе данных глубокого и структурного бурения, проведенного в разное время на площади депрессии.

Протерозойские породы (гнейсы, гранито-гнейсы, кристаллические сланцы, метаморфизованные песчаники) и палеозойские породы (кварциты, песчаники, сланцы, метаморфизованные известняки) обнажаются в бассейнах рек Селемджа, Деп, Амур и в горных сооружениях хребта Турана. Одни специалисты (Свистунов, 1987) считали, что эти породы слагают гетерогенный фундамент Зее-Буреинской впадины архей-палеозойского возраста, другие (Курина, 1954) склонялись к тому, что фундамент представлен гетерогенными породами архей-протерозойского возраста, и не включали в его состав отложения палеозоя. Выходы древних толщ на поверхность в обрамлении Зее-Буреинской впадины позволяют предположить, что кристаллический фундамент сложен разновозрастным сильнодислоцированным комплексом магматических, метаморфических и осадочных пород архей-палеозойского возраста. Самый древний комплекс пород (серии Синхуадукоу и гонжинская) отмечен в северном и юго-западном обрамлении впадины. Представлен он биотитовыми, биотит-роговообманковыми сланцами, пироксен-амфиболит-роговообманковыми гнейсами. Домезозойский фундамент вскрыт глубокими скважинами и представлен роговообманковыми биотитовыми гранитами, гранодиоритами (ИТК-1), гранодиоритами биотитовыми (БЛЦ-2), кварцевыми диоритами (НКС-3), гранитоидами (РДТ-1, 19-к), гранитами (10-к, 14-к). Породы нередко сильно дислоцированы, катаклазированы и трещиноваты, разрушены и представляют собой брекчии гранитов.

В строении впадины выделяется два структурных этажа, разделенных резким угловым несогласием. Нижний структурный этаж представлен домезо-

зойским складчатым фундаментом, верхний – платформенным осадочным чехлом. Верхний структурный этаж разделен на три подэтажа, каждый из которых отвечает определенному этапу формирования впадины. Нижний рифтогенный подэтаж – юрские отложения екатеринославской свиты, развитые в наиболее погруженных участках впадины. Между екатеринославскими и перекрывающими их итикутскими отложениями фиксируется угловое несогласие. Толщина нижнего подэтажа превышает 500 м, в Екатеринбургском прогибе она составляет более 1000 м. Средний подэтаж – ниже-верхнемеловые отложения итикутской, пояровской и завитинской свит. Диапазон их площадного распространения изменяется вверх по разрезу от приуроченных к наиболее погруженным участкам впадины итикутских отложений до почти повсеместного площадного распространения завитинской свиты. Толщина отложений среднего подэтажа меняется от 500 м на поднятиях домезозойского фундамента до более 2000 м в центральных частях прогибов. Верхний структурный подэтаж включает верхнемеловые-палеогеновые (цагаянские) и кайнозойские отложения, повсеместно развитые в пределах впадины.

Тектоника. Зее-Буреинская депрессия от верхней юры до нижнего альба (верхи нижнего мела) проходила рифтогенную стадию развития [8–10]. В результате образовалась система грабенов и горстов с интенсивным вулканизмом вдоль разломов. Данные грабены были выполнены отложениями екатеринославской, итикутской и пояровской свит. Грубообломочный и полимиктовый состав, плохая сортировка и окатанность терригенных отложений итикутской свиты говорят о ее образовании в условиях резко расчлененного рельефа. При этом происходила активизация краевых глубинных разломов, вдоль которых в условиях растяжения проявилась интен-

сивная вулканическая деятельность. В период накопления осадков поярковской свиты преобладал сравнительно спокойный тектонический режим – вулканическая деятельность вдоль краевых глубинных разломов продолжала сохраняться, но с меньшей активностью. Осадочные бассейны северо-востока Китая, в которых установлены месторождения нефти и газа, и Российской территории, потенциально перспективные на обнаружение углеводородного сырья, однотипны по генезису: рифтогенные, сформировавшиеся в процессе крупноамплитудных сбросово-сдвиговых перемещений по трансрегиональным зонам глубинных разломов северо-восточного и субмеридионального простирания [11].

Геоэлектрическая характеристика. На Зее-Буреинской площади выделяется 6–7 геоэлектрических горизонтов (рис. 1). Геоэлектрические горизонты верхней части разреза включают хорошо проводящие отложения цагаянской и завитинской свит, в состав которых в основном входят терригенные разности пород и местами угли, гравий. Продольное сопротивление их колеблется от 5 до 25 Ом·м, толщина – от 200 до 800 м. Данные свиты почти повсеместно распространены по площади. Геоэлектрические горизонты, связанные с нижезалегающей толщей, представлены поярковской и итикутской свитами. Они характеризуются наибольшими толщинами во впадинах. В составе пород данных свит

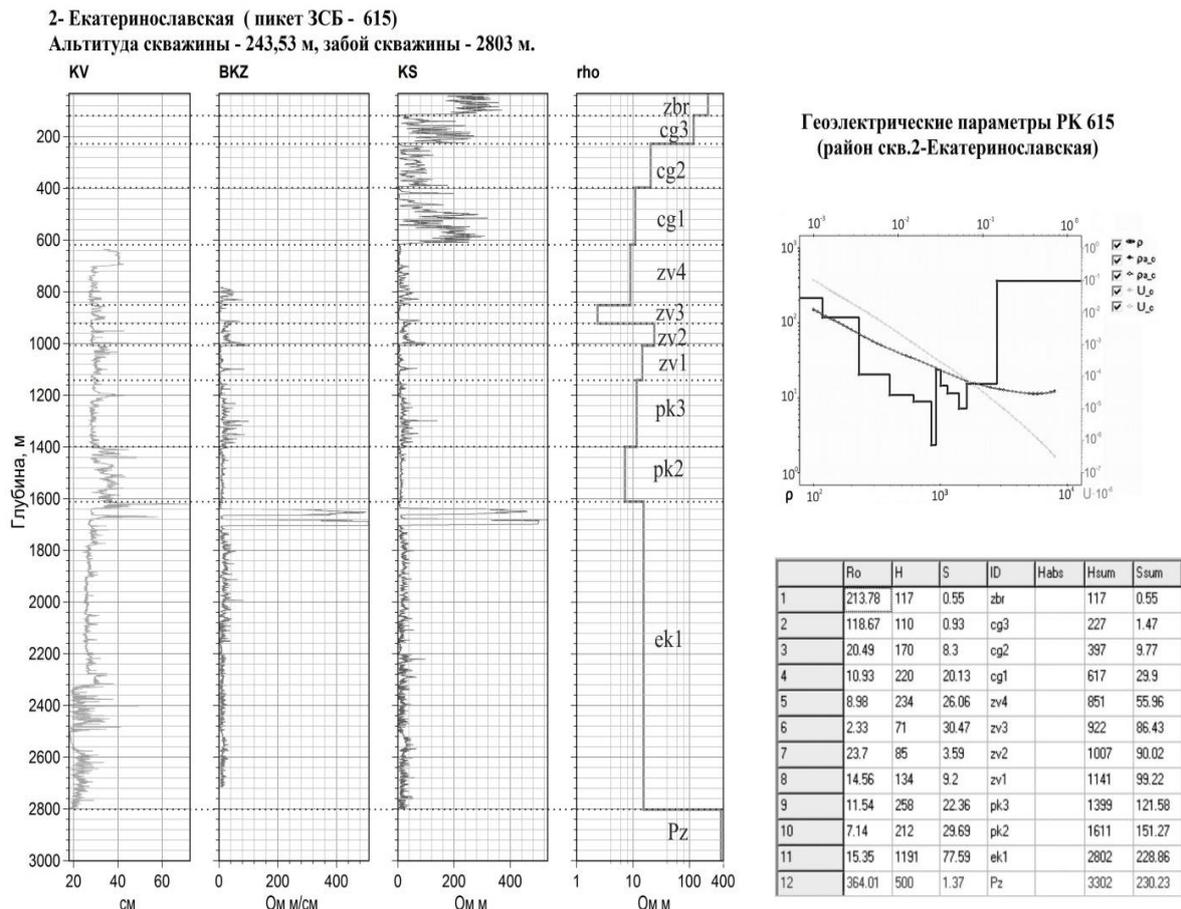


Рис. 1. Геоэлектрическая характеристика разреза в районе скважины 2-Екатеринославской Зее-Буреинского потенциально нефтегазоносного бассейна
Fig. 1. Geoelectric characteristic of the section in the area of the 2-Ekaterinoslavskaya well of the Zeya-Bureya potentially oil and gas bearing basin

участвуют осадочные терригенные отложения и эффузивно-осадочные породы, обладающие более повышенным сопротивлением относительно верхних горизонтов. В итукутской свите кроме терригенных разностей встречаются высокоомные породы, представленные базальтами, андезит-порфирами, гранитоидритами и туфогенными породами. Подстилаются данные отложения породами екатеринославской свиты, которая характерна для глубоких грабен с абсолютными отметками домезазойского фундамента, составляющим по данным бурения -2300...-2560 м. Мощность свиты достигает от 600 до 1200 м. Представлена свита переслаиванием песчаников, алевролитов, прослоями туффитов, также гравелитами и глинистыми песчаниками, обладающими пониженным сопротивлением. Данная свита является нефтематеринской.

Материалы и методы исследований

Материалы, использованные в статье, получены в ходе государственных электроразведочных работ методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) на Зее-Буреинской площади (Зее-Буреинский бассейн). Для изучения геоэлектрических особенностей в условиях структурно-тектонических и фильтрационно-емкостных свойств разреза на этапе качественного анализа проанализированы параметрические кривые ЗСБ (рис. 2) в районе скважин глубокого бурения. Также построены дифференциальные разрезы сопротивления dS/dH , основой для которых служила модель «проводящей плоскости» $S(H)$ [12]. Впоследствии дифференциальные разрезы сопротивления были совмещены с временными разрезами сейсморазведки.

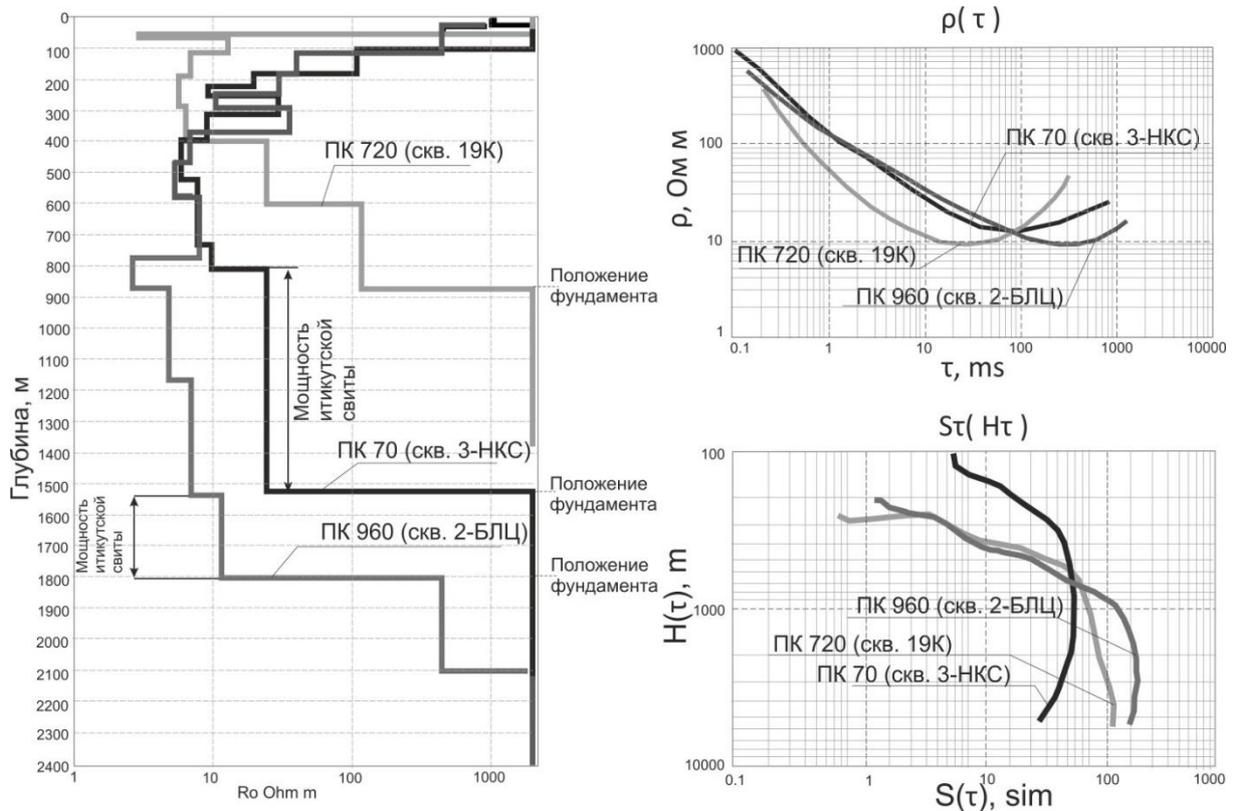


Рис. 2. Типичные кривые зондирования становлением поля в ближней зоне в районе скважин глубокого бурения
Fig. 2. Typical curves of TEM sounding in the near zone in the area of deep hole wells

Полученные результаты и их обсуждение

В результате качественного анализа материалов ЗСБ были выявлены типичные кривые, характеризующие различные типы разреза и различную глубину залегания опорного горизонта. Значительную сложность представляет стратиграфическая привязка геоэлектрических горизонтов в разрезах с резко изменяющейся структурой и литологическим составом в латеральном и вертикальном направлениях. Примером такой ситуации может служить район скважин, расположенных близко друг от друга, однако вскрывших разрез с резко изменяющимися толщинами итикутской и поярковской свит на одном гипсометрическом уровне (см. рис. 2).

В процессе сопоставления дифференциальных разрезов и сейсморазведки между Ромненским и Романовским прогибами были обнаружены вулканические аппараты (рис. 3). В волновом поле выделяются вулканические конусы, в пределах которых наблюдаются субвертикальные проводящие аномалии, локализуемые на глубинах 2–5 км. Особенно четкая картина фиксируется по профилю № 11, где интенсивные проводники размещаются в центре конуса в соответствии с положением жерла. Сопротивление составляет 20–35 Ом·м, проводимость – до 100 См, глубина залегания – 2–4 км.

По профилю № 2 фиксируется более сложная картина. В пределах конуса размещаются два интенсивных субверти-

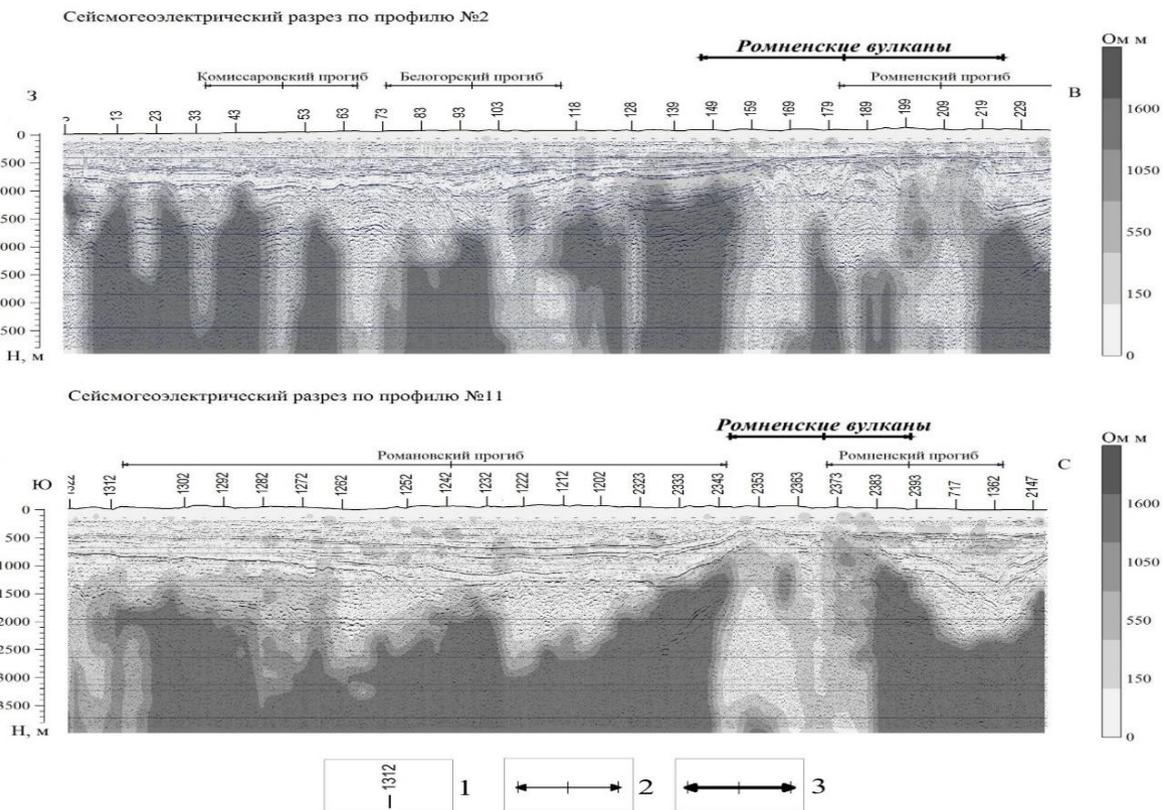


Рис. 3. Сейсмогеоэлектрические разрезы по профилям № 2, 11:

1 – пункты зондирования становлением поля в ближней зоне; 2 – геологические структуры;
3 – выделенные по данным зондирования становлением поля в ближней зоне «Ромненские» вулканы

Fig. 3. Seismic-geoelectric sections by the profiles no. 2, 11:

1 – points of TEM sounding in the near zone; 2 – geological structures;
3 – “Romnensky” volcanoes identified by the data of TEM sounding in the near zone

кальных проводника, представляющих два вулкана или два канала. Они сливаются выше по разрезу и, возможно, в кратере образуют аномалии, дифференцирующиеся по сопротивлению. В центре отмечается аномалия с сопротивлением от 1 до 3 Ом·м, проводимость ее составляет более 1000 См. Она простирается на глубину от 500 м до 1,5 км. Представляется, что породы, выполняющие жерло вулкана, содержат компоненты с электронной проводимостью.

При 3D-визуализации видно, что аномалии по профилям № 2 и 11 объединяются в одну систему с общим корнем (рис. 4). В плане вулкан по нижнему периметру занимает площадь 800 км². По названию населенного пункта вулкан назван Ромненским. Поскольку в контуре два вулкана и контур вытянут в широтном направлении, по-видимому, их можно отнести к гнездовому типу.

Контрастно выделяется воронкообразная проводящая аномалия по профилю № 9 (рис. 5). Морфологически она согласуется с характером волновой картины, простираясь на большую глубину. Аномалия приурочена к глубинному раз-

лому, на юго-западном продолжении которого, по профилю № 3, проявляется вулкан. В этой связи предполагается, что интенсивная аномалия по профилю № 9 сформировалась на месте вулкана, разрушенного активными тектоническими процессами, которые способствовали формированию Белогорского прогиба.

Выводы

В заключение хотелось бы отметить, что, несмотря на сложности геологического строения разреза, метод ЗСБ показал высокую геологическую эффективность. Четко откартированы поднятия и впадины, грабены, рельеф опорного горизонта, обусловленного поверхностью палеозоя. Геоэлектрические границы, связанные с верхами цагайской, завинской и поярковской свит, в целом соответствуют отражающим границам во временном поле. Здесь следует сказать, что комплекс геофизических методов электроразведки (ЗСБ) и сейсморазведки позволяет во многих неоднозначных геологических ситуациях проводить уверенную интерпретацию, корректно определять размещение и структуру екатеринославской свиты, структуру палеозоя.

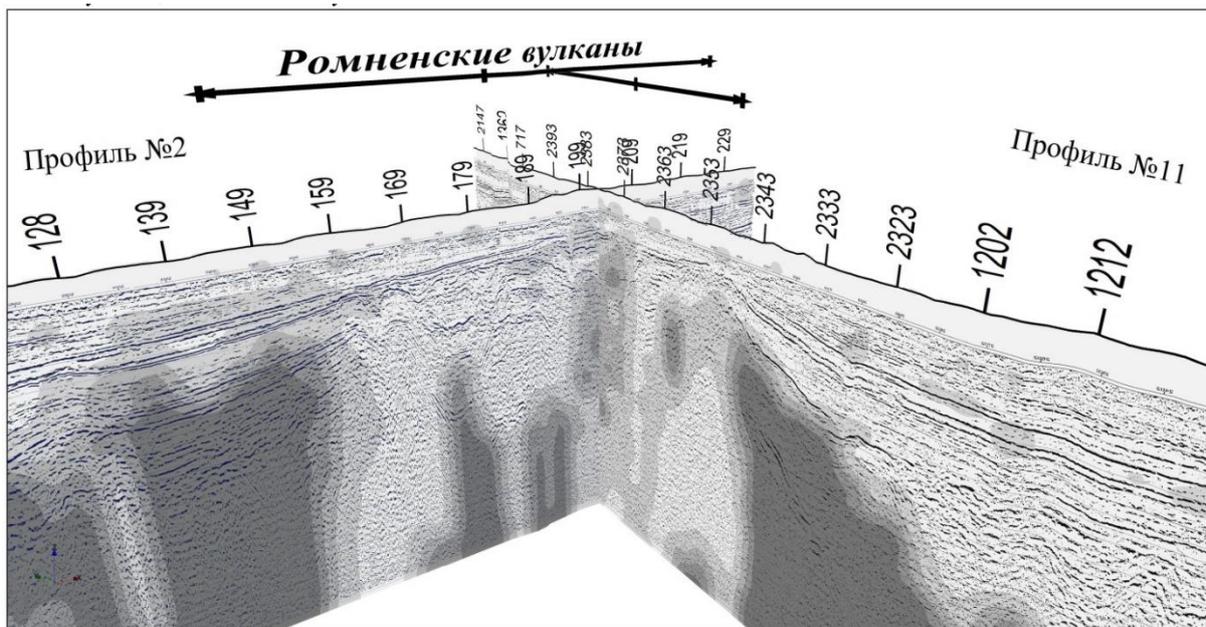


Рис. 4. 3D-визуализация «Ромненских» вулканов
Fig. 4. 3D-visualization of "Romnensky" volcanoes

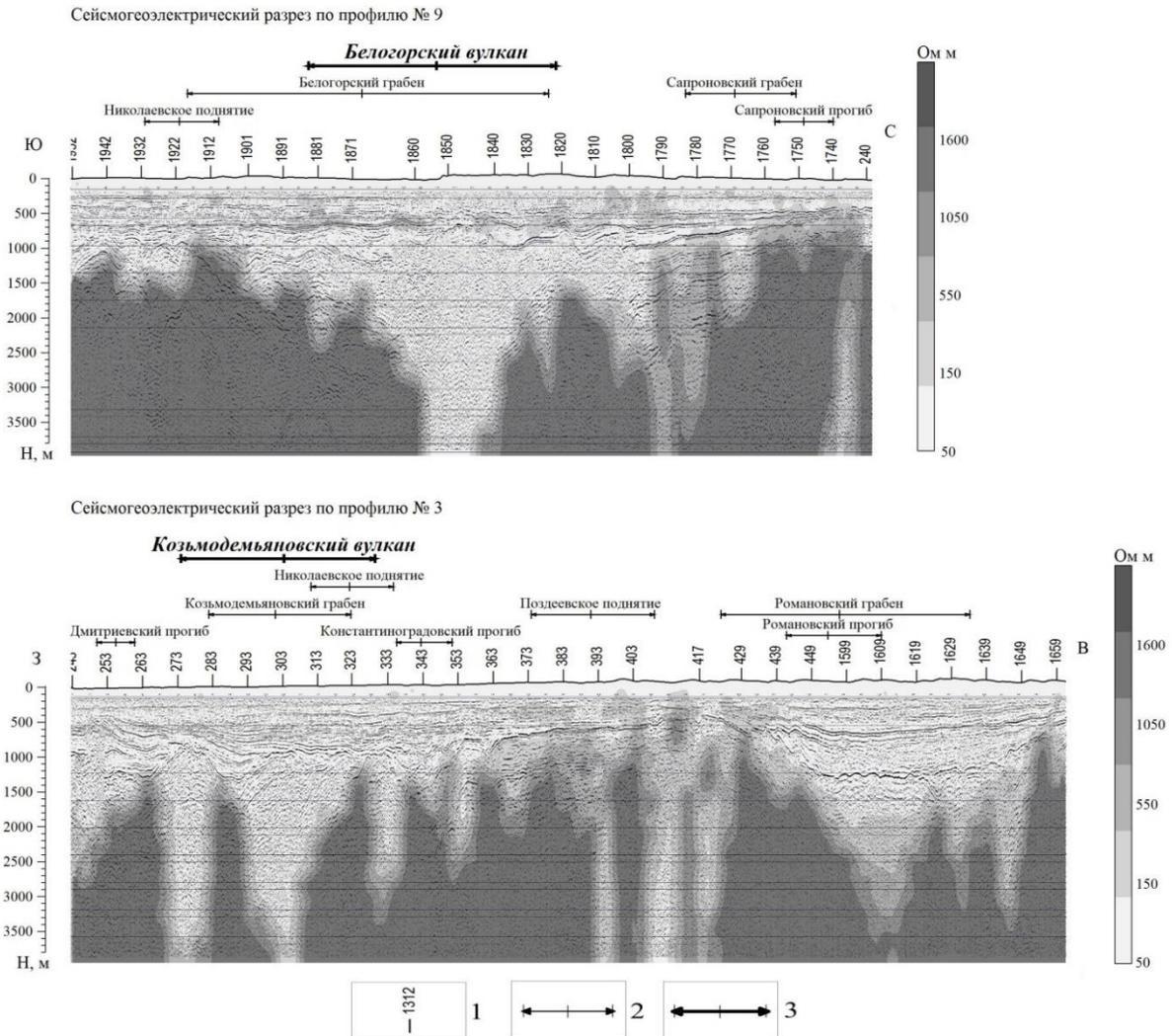


Рис. 5. Сейсмогеоэлектрические разрезы по профилям № 9, 3:

1 – пункты зондирования становлением поля в ближней зоне; 2 – геологические структуры;
3 – выделенные по данным зондирования становлением поля в ближней зоне вулканы

Fig. 5. Seismic-geoelectric sections by profiles no. 9, 3:

1 – points of TEM sounding in the near zone; 2 – geological structures;
3 – volcanoes identified by the data of TEM sounding in the near zone

Также благодаря методу ЗСБ были выявлены вулканические аппараты, представляющие огромный интерес при постановке дальнейшего бурения и при поиске

месторождений различных полезных ископаемых, образовавшихся в результате вулканической деятельности.

Библиографический список

1. Игнатова В.А. Сравнение геодинамической эволюции бассейнов Зее-Буреинского и Сунляо в связи с перспективами нефтегазоносности // Геология нефти и газа. 2010. № 2. С. 19–28.

2. Буряк В.А., Бакулин Ю.И., Беспалов В.Я., Врублевский А.А., Гагаев В.Н., Галичанин, Е.Н., Кириллова Г.Л., Лошак Н.П., Нигай Е.В., Пляскин В.А., Троян В.Б. Нефтегазоносность юга Дальнего

Востока и сопредельных регионов (сопоставительный анализ). Хабаровск: Изд-во ИКАРП ДВО РАН, 1998. 245 с.

3. Цао С.К., Кириллова Г.Л., Сорокин А.П., Каплун В.Б., Цао Х.С., Цю Ю., Чжан Ю.Дж. Строение, эволюция Сунью-Цзяинского бассейна северо-восточного Китая и его связь со структурами Зейско-Буреинского бассейна Российского Дальнего Востока // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 6. С. 68–78.

4. Бернштейн Г.Л., Волхонини В.С., Горбачев И.Ф., Крупская Г.В., Мальденбаум М.М., Щербаклова Б.Е. Геологическая структура Зее-Буреинской впадины по результатам региональных геолого-геофизических работ // Геофизические исследования при решении геологических задач в Восточной Сибири. Вып. 4. М.: Недра, 1970. С. 271–300.

5. Лишневицкий Э.Н., Степанов П.П. Основные черты тектоники центральной и южной частей Зее-Буреинской депрессии // Геология и геофизика. 1963. № 5. С. 117–122.

6. Сорокин А.П., Глотов В.Д. Золотоносные структурно-вещественные ассоциации Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1997. 304 с.

7. Шатков Г.А., Бабаев А.О., Макси-

мовский В.А., Пуринг В.В. Тафрогенный комплекс Амуро-Зейской депрессии и перспективы его рудоносности // Тихоокеанская геология. 1984. № 3. С. 54–67.

8. Кириллова Г.Л., Крапивенцева В.В., Гресов А.И. Меловой этап развития Цзямусы-Буреинского фрагмента континентальной окраины (на примере бассейнов Буреинского и Хэган) // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 2. С. 18–31.

9. Кириллова Г.Л. Сравнительная характеристика внутриконтинентальных рифтовых бассейнов Восточной Азии: Сунляо и Амуро-Зейский // Тихоокеанская геология. 1994. Т. 13. № 6. С. 33–54.

10. Сорокин А.П., Малышев Ю.Ф., Каплун В.Б., Сорокина А.Т., Артеменко Т.В. Основные черты эволюции и глубинного строения Зейско-Буреинского и Сунляо осадочных бассейнов (Восточная Азия) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 2. С. 3–19.

11. Игнатова В.А. Геодинамическая эволюция и перспективы нефтегазоносности Зее-Буреинского бассейна // Геология нефти и газа. 2008. № 2. С. 14–26.

12. Сидоров В.Л., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. Саратов: Изд-во НВНИИГИГ, 1969. 68 с.

References

1. Ignatova V.A. Comparison of geodynamic evolution of Zeya-Bureya and Songliao basins as regards their oil and gas potential. *Geologiya nefiti i gaza* [Oil and Gas Geology], 2010, no. 2, pp. 19–28. (In Russian).

2. Buryak V.A., Bakulin Yu.I., Bepalov V.Ya., Vrublevskii A.A., Gagaev V.N., Galichanin, E.N., Kirillova G.L., Loshak N.P., Nigai E.V., Plyaskin V.A., Troyan V.B. *Neftegazonosnost' yuga Dal'nego Vostoka i sopredel'nykh regionov (sopostavitel'nyi analiz)* [Petroleum potential of the south of Far East and adjacent regions (comparative analysis)]. Khabarovsk:

Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences Publ., 1998, 245 p. (In Russian).

3. Tsao S.K., Kirillova G.L., Sorokin A.P., Kaplun V.B., Tsao Kh.S., Tsyu Yu., Chzhan Yu.Dzh. Structure and evolution of the Sunwu-Jiayin basin in NE China and its relation to the Zeya-Bureya basin in the Far East of Russia. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2013, vol. 32, no. 6, pp. 68–78. (In Russian).

4. Bernshtein G.L., Volkhonini V.S., Gorbachev I.F., Krupskaya G.V., Mal'denbaum M.M., Shcherbakova B.E. *Geolo-*

gicheskaya struktura Zee-Bureinskoi vpadiny po rezul'tatam regional'nykh geologo-geofizicheskikh rabot [Geological structure of the Zeya-Bureya depression by the results of regional geological and geophysical studies]. *Geofizicheskie issledovaniya pri reshenii geologicheskikh zadach v Vostochnoi Sibiri* [Geophysical studies in solving geological problems in East Siberia]. Iss. 4. Moscow: Nedra Publ., 1970, pp. 271–300. (In Russian).

5. Lishnevskii E.N., Stepanov P.P. Main tectonic features of the Central and southern parts of the Zeya-Bureya depression. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1963, no. 5, pp. 117–122. (In Russian).

6. Sorokin A.P., Glotov V.D. *Zolotonosnye strukturno-veshchestvennye assotsiatsii Dal'nego Vostoka* [Gold-bearing structural-material associations of the Far East]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 1997, 304 p. (In Russian).

7. Shatkov G.A., Babaev A.O., Maksimovskii V.A., Puring V.V. Taphrogenic complex of Amur-Zeya depression and prospects of its ore content. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1984, no. 3, pp. 54–67. (In Russian).

8. Kirillova G.L., Krapiventseva V.V., Gresov A.I. Cretaceous stage in the evolu-

tion of the Jiamusi-Bureya fragment of the continental margin as exemplified by the Bureya and Hegang basins. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2015, vol. 34, no. 2, pp. 18–31. (In Russian).

9. Kirillova G.L. Comparative characteristics of intracontinental rift basins of East Asia: Sunlyao and Amur-Zeya. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1994, vol. 13, no. 6, pp. 33–54. (In Russian).

10. Sorokin A.P., Malyshev Yu.F., Kaplun V.B., Sorokina A.T., Artemenko T.V. Evolution and deep structure of the Zeya-Bureya and Songliao sedimentary basins (East Asia). *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2013, vol. 32, no. 2, pp. 3–19. (In Russian).

11. Ignatova V.A. Geodynamic evolution and oil and gas potential of Zeya-Bureya basin. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and Gas Geology], 2008, no. 2, pp. 14–26. (In Russian).

12. Sidorov V.L., Tikshaev V.V. *Elektrorazvedka zondirovaniyami stanovleniem polya v blizhnei zone* [Electrical prospecting by TEM sounding in the near zone]. Saratov: NizhneVolzhsky Research Institute of Geology and Geophysics Publ., 1969, 68 p. (In Russian).

Критерии авторства

Кочукова В.А., Пашевин А.М. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kochukova V.A, Pashevin A.M. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.271

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-89-96>

ТЕХНИКА ДЛЯ ВЫЕМКИ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ И ТЕХНОЛОГИЯ ДАННОГО ПРОЦЕССА

© А.Ю. Чебан^а

^аИнститут горного дела ДВО РАН,
680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51.

РЕЗЮМЕ: На Дальнем Востоке разведано значительное количество маломасштабных рудных месторождений благородных металлов, к достоинствам многих из них можно отнести малую глубину залегания рудных тел и относительно высокое содержание металла в руде. В связи с этим целью данной статьи является создание выемочного комплекса для разработки крутопадающих рудных тел умеренной мощности. В работе анализируются известные технические устройства и способы выемки полезных ископаемых, обеспечивающие уменьшение объемов вскрышных работ при освоении месторождений. Современные горные машины, оснащенные фрезерными рабочими органами, позволяют вести выемку прочных горных пород без их предварительного ослабления или рыхления посредством буровзрывных работ. Автором предлагается технология разработки крутопадающих рудных тел умеренной мощности с применением выемочного комплекса и гусеничных самосвалов для осуществления работ на труднодоступных участках, куда строительство дорог и переброска разнообразной горной техники для отработки традиционными технологиями зачастую оказывается экономически нецелесообразной. Выемочный комплекс установлен на гусеничном шасси и оснащен бульдозерным оборудованием, телескопической стрелой с фрезерным рабочим органом и ковшовым погрузочным оборудованием для подъема отфрезерованной горной массы из забоя на дневную поверхность. Перемещение фрезерного рабочего органа в забое осуществляется посредством телескопического оголовка, шарнирно прикрепленного к выдвижной секции телескопической стрелы. Технология разработки маломасштабных крутопадающих рудных тел с использованием предлагаемого выемочного комплекса позволяет уменьшить количество горного оборудования и производственного персонала в сравнении с известными схемами ведения горных работ, а также обеспечить минимальный объем вскрышных работ.

Ключевые слова: благородные металлы, горная масса, фрезерный рабочий орган, ковш погрузчика, гусеничный самосвал

Информация о статье: Дата поступления 14 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 3 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Чебан А.Ю. Техника для выемки крутопадающих рудных тел и технология данного процесса. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):89–96. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-89-96.

MACHINES FOR EXTRACTION OF STEEPLY DIPPING ORE BODY AND TECHNOLOGY OF THIS PROCESS

© Anton Yu. Cheban^а

^аMining Institute of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences,
51 Turgenev St., Khabarovsk 680000, Russian Federation.

^аЧебан Антон Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехнологии и горной теплофизики, тел.: 8 (4212) 327927, e-mail: chebanay@mail.ru
Anton Yu. Cheban, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Geotechnology and Mining Thermal Physics, tel.: 8 (4212) 327927, e-mail: chebanay@mail.ru

ABSTRACT: A considerable amount of small-scale ore deposits of precious metals has been explored in the Far East. Many of them are characterized by advantageous small depth of ore bodies and relatively high content of metal in the ore. Therefore, the purpose of the article is creation of an excavation complex for the development of steeply dipping ore bodies of moderate thickness. The article analyzes the well-known technical devices and mineral excavation methods that decrease the volumes of overburden operations under the development of deposits. Modern mining machines are equipped with milling tools allow to carry out the excavation of solid rocks without their prior weakening or loosening by drilling and blasting. The author proposes a technology for developing steeply dipping ore bodies of moderate thickness using an excavation complex and crawler dumps to perform mining in remote areas where the construction of roads and delivery of various mining equipment for mining by traditional technologies are often not economically feasible. The excavation complex is mounted on a crawler chassis and is equipped with dozer equipment, a telescopic boom with a milling working body and a bucket loading equipment for lifting the milled rock mass from the mine face to the daylight surface. The movement of the milling working body in the bottom is carried out by means of a telescopic tip that is pivotally attached to the telescopic boom sliding section. The mining technology of small-scale steeply dipping ore bodies with the use of the proposed excavation complex allows to reduce the number of mining equipment and production overburden removal.

Keywords: *precious metals, rock mass, milling tool, loader bucket, crawler dump*

Information about the article: Received November 14, 2018; accepted for publication December 3, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Cheban A.Yu. Machines for extraction of steeply dipping ore bodies and technology of this process. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):89–96 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-89-96.

Введение

Разработка месторождений твердых полезных ископаемых, сложенных прочными горными породами, в основном ведется с применением буровзрывных работ [1–3]. Недостатками буровзрывной подготовки горных пород к выемке являются многооперационность технологического процесса, необходимость в отводе горного оборудования перед проведением взрыва, переизмельчение части горной массы и одновременный выход крупнокусковых фракций и негабаритов, требующих повторного взрывания, а также перемешивание полезного ископаемого с пустой породой, особенно при разработке сложноструктурных месторождений. В настоящее время активно развиваются технологии безвзрывной выемки горных пород с применением машин циклического и непрерывного действия [4–7]. К машинам непрерывного действия относятся карьерные комбайны, фрезерные машины, комплексы глубокой разработки пла-

стов, данное горное оборудование обычно оснащено рабочими органами фрезерного типа. Фрезерные рабочие органы позволяют достаточно эффективно разрабатывать горные породы прочностью на сжатие до 80–100 МПа и более.

Постановка проблемы

На Дальнем Востоке разведано значительное количество маломасштабных рудных месторождений благородных металлов, достоинствами многих из них является малая глубина залегания рудных тел и относительно высокое содержание металла в руде [8]. Однако данные месторождения обычно расположены в удаленных и труднодоступных районах, где, как правило, отсутствует централизованное энергоснабжение и почти все виды горных работ выполняются самоходными машинами с дизельным приводом, а машины на электроприводе приводятся в действие от дизельных электростанций. Плохое состояние дорог, а чаще всего и их полное

отсутствие, большие расстояния ведут к значительным издержкам при выполнении транспортных работ. Строительство дорог и переброска разнообразной горной техники для отработки малых рудных месторождений традиционными технологиями с применением буровзрывных работ в связи с малой мощностью рудных тел и их крутым падением зачастую оказываются экономически нецелесообразными.

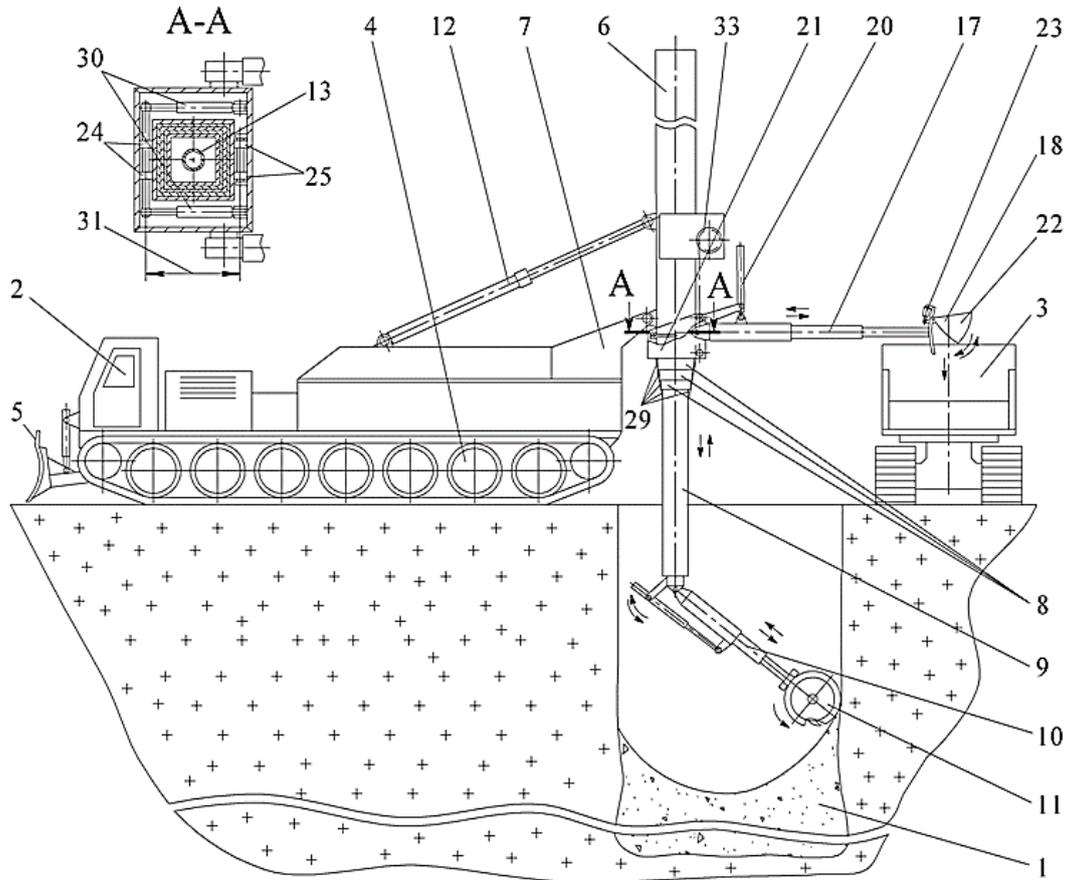
Появление новой техники позволяет значительно трансформировать технологии ведения горных работ. Так, для доработки запасов полей угольных месторождений используются комплексы глубокой разработки пластов, оборудованные дистанционно управляемым фрезерным рабочим органом, внедряемым в пласт с помощью напорного усилия конвейера, последовательно наращиваемого по мере углубления [9]. Однако комплексы глубокой разработки с конвейерным ставом позволяют отрабатывать горизонтальные и наклонные пласты, угол падения которых не превышает 18–20°. Для доработки кимберлитовых месторождений предлагаются углубочные комплексы, включающие углубочные экскаваторы и гусеничные автосамосвалы, фрезерные машины и гусеничные скреперы, обеспечивающие возможность движения по дорогам с продольным уклоном до 30 % [10, 11], однако данные технологии нецелесообразно применять для разработки маломасштабных рудных тел.

Известна конструкция комплекса для разработки маломасштабных крутопадающих месторождений, включающая колесное шасси, телескопическую стрелу с промежуточной секцией и головной секцией, на которой установлен фрезерный рабочий орган [12]. Комплекс оборудован системой пневмотранспортирования отфрезерованной горной массы и выдвижными опорами для обеспечения устойчивости комплекса при разработке

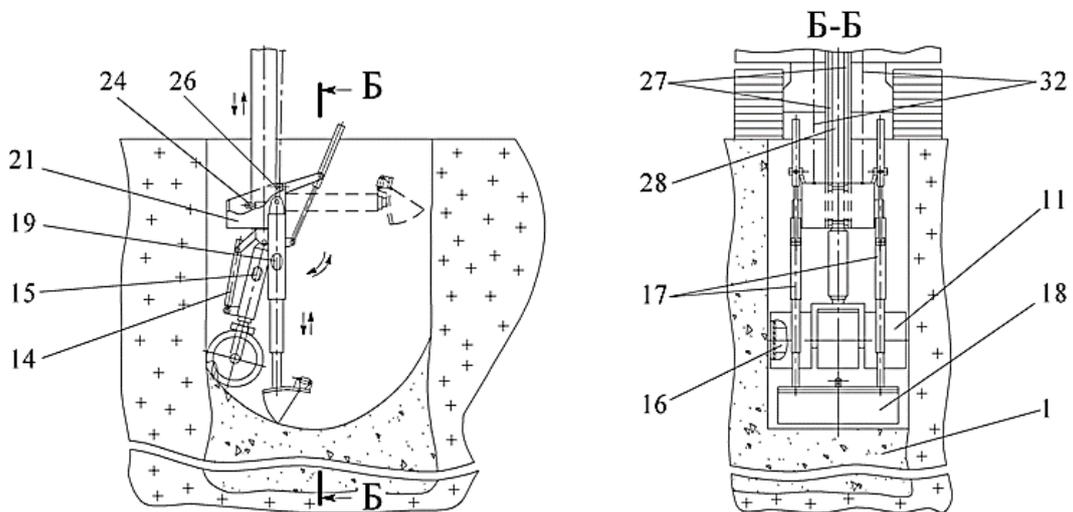
месторождения. К недостаткам комплекса можно отнести сравнительно невысокую проходимость колесного ходового оборудования, а также необходимость применения дополнительной техники, в частности бульдозера, для ведения вскрышных, планировочных и вспомогательных работ. Кроме того, необходимо отметить невысокую надежность и малую долговечность системы пневмотранспортирования из-за возможности ее остановок в случае попадания в пневмопровод относительно крупных кусков рудной массы, которые могут образовываться при фрезеровании трещиноватого массива, заклинивания элементов телескопического пневмопровода при попадании в зазоры мелких частиц и быстрого износа пневмопроводов в случае перемещения абразивного материала.

Результаты исследований

Автором предлагается технология разработки крутопадающих рудных тел 1 умеренной мощности с применением выемочного комплекса 2 и гусеничных самосвалов 3 для осуществления работ на труднодоступных участках (рисунок). Выемочный комплекс 2 установлен на гусеничном шасси 4 и оснащен бульдозерным оборудованием 5. Телескопическая стрела 6 шарнирно установлена на раме 7 и имеет несколько выдвижных секций 8, 9. На последней выдвижной секции 9 установлен телескопический оголовок 10 с фрезерным рабочим органом 11. Подъем телескопической стрелы 6, ее выдвижение, поворот телескопического оголовка 10 и его выдвижение осуществляется соответственно гидроцилиндрами 12, 13, 14, 15. Вращение фрезерного рабочего органа 11 производится встроенным гидроприводом 16. Сдвоенная стрела 17 ковша погрузчика 18 с гидроцилиндрами управления 19, 20 шарнирно прикреплена к каретке 21, ковш погрузчика 18 оборудован козырьком 22, управляемым гидроцилиндром 23. Каретка на трех парах роликов 24,



a



b

Выемочный комплекс для разработки крутопадающих рудных тел:

a – отработка рудного тела фрезерным рабочим органом и разгрузка горной массы из ковша погрузчика в гусеничный самосвал; b – заполнение ковша погрузчика горной массой в забое

Mining complex for developing steeply dipping ore bodies:

a – ore body mining by a milling working body and rock mass unloading from the loader bucket to a crawler dump; b – filling the loader bucket with rock mass

25, 26 установлена в направляющих 27, расположенных на поверхностях 28 выдвижных секций 8, 9 телескопической стрелы 6. Плавный переход между направляющими 27 выдвижных секций 8, 9 осуществляется посредством скатов 29. Пара роликов 24 взаимодействует со штоками гидроцилиндров 30, что позволяет изменять межосевое расстояние 31. Каретка 21 на двух канатах 32 подвешена на лебедке 33, закрепленной на телескопической стреле 6.

Разработка крутопадающих рудных тел умеренной мощности ведется следующим образом. Посредством бульдозерного оборудования 5 выемочного комплекса 2 производится зачистка и выравнивание площадки, после чего комплекс 2 позиционируется относительно рудного тела 1. Гидроцилиндрами 12, 13 производится подъем телескопической стрелы 6 и телескопирование выдвижных секций 8, 9 до контакта фрезерного рабочего органа 11 с горным массивом, после чего начинается обработка рудного тела 1. Посредством телескопического оголовка 10 и гидроцилиндров 14, 15 фрезерный рабочий орган 11 перемещается относительно забоя и обрабатывает рудное тело 1.

После скапливания разрыхленной горной массы в забое телескопический оголовок 10 втягивается и перемещает фрезерный рабочий орган 11 в крайнее положение (см. рисунок, *b*). Одновременно ковш погрузчика 18 на сдвоенной стреле 17, развернутой соосно телескопической стреле 6, вместе с кареткой 21 на канатах 32 лебедки 33 опускается под действием силы тяжести. Каретка 21 перемещается относительно выдвижных секций 8, 9 телескопической стрелы 6 на трех парах роликов 24, 25, 26 по направляющим 27, при этом переход с одной выдвижной секции на другую (меньшую) осуществляется по скатам 29 с одновременным уменьшением межосевого расстояния 31 посредством гидроцилин-

дров 30. При достижении забоя ковш погрузчика 18 заполняется отфрезерованной горной массой при помощи выдвижения и поворота гидроцилиндрами 19, 20 сдвоенной стрелы 17. После заполнения ковша погрузчика 18 сдвоенная стрела 17 втягивается и поворачивается в горизонтальное положение. Канаты 32 начинают наматываться на лебедку 33, и каретка 21 с заполненным ковшом погрузчика 18 поднимается на дневную поверхность в верхнее положение. У движущейся вверх вдоль направляющих 27 каретки 21 при перемещении по скатам 29 с одной выдвижной секции на другую (большую) гидроцилиндрами 30 увеличивается межосевое расстояние 31. В верхнем положении сдвоенная стрела 17 выдвигается, козырек 22 ковша погрузчика 18 посредством гидроцилиндра 23 открывается, горная масса высыпается в кузов гусеничного самосвала 3 (см. рисунок, *a*). Во время подъема ковша погрузчика 18 с горной массой, его разгрузки и опускания в обратном направлении ведется обработка рудного тела 1 фрезерным рабочим органом 11.

По предварительным расчетам разработка крутопадающих рудных тел с использованием предлагаемого выемочного комплекса может вестись на глубину до 70–80 м, что достаточно для обработки рудных тел многих маломасштабных месторождений. При выемке рудных жил небольшой мощности или обработке зон прожилкования, при значительных содержаниях благородных металлов в руде работа выемочного комплекса может осуществляться и с допустимым разубоживанием руды.

Выводы

Технология разработки маломасштабных крутопадающих рудных тел с использованием предлагаемого выемочного комплекса позволяет уменьшить количество горного оборудования и производственного персонала в сравнении с известными схемами ведения

горных работ. Применение гусеничной горной и транспортной техники обеспечит возможность разработки небольших месторождений, находящихся в труднодоступных условиях. Использование для подъема разрыхленной горной массы из забоя на дневную поверхность ковшового рабочего органа позволит повысить надежность работы выемочного ком-

плекса в сравнении с конструктивными схемами, использующими пневмотранспорт горной массы. Разработка рудных тел с применением выемочного комплекса также обеспечит минимальную величину коэффициента вскрыши при открытой разработке маломасштабных месторождений.

Библиографический список

1. Павлов А.М., Васильев Д.С. Совершенствование технологии подземной разработки тонких крутопадающих тел золоторудного месторождения Коневинского // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 88–94.
2. Викторов С.Д., Галченко Ю.П. Теоретические и экспериментальные исследования характера распределения энергии в массиве горных пород при взрыве технологических зарядов // Инженерная физика. 2018. № 7. С. 43–50.
3. Чебан А.Ю. Добычный комплекс для открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 3. С. 8–11.
4. Kumar C., Murthy V., Kumaraswamidhas L., Prakash A. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength – Some investigations // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2016. Vol. 64. P. 181–186.
5. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. Russia // Zement-Kalk-Gips Int. 2014. Vol. 67. № 10. P. 18–19.
6. Prakash A., Murthy V., Singh K. Rock excavation using surface miners: An overview of some design and operational aspects // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23. P. 33–40.
7. Niemann-Delius C. Mining technical and profitability of Continuous Surface Mining for two open-pit coal mines in Yugoslavia based on Krupp Surface Mining // Braunkohle. 1991. № 11. P. 24–27.
8. Глотов В.В. Об инвестиционной привлекательности мелких месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 10. С. 101–104.
9. Ромашкин Ю.В. Доработка запасов карьерных полей угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 10. С. 70–74.
10. Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Фурин В.О. Обоснование технологических параметров углубочного комплекса // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 9. С. 2–10.
11. Чебан А.Ю. Способ доработки глубокого карьера с применением фрезерных машин // Маркшейдерия и недропользование. 2017. № 4. С. 23–29.
12. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 18–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>.

References

1. Pavlov A.M., Vasiliev D.S. Improving underground mining technology of steeply dipping thin ore bodies of Konevinskoe gold deposit. *Izvestija Sibirskogo otdelenija Sekcii nauk o Zemle Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Geologija, razvedka i razrabotka mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2017, vol. 40, no. 2, pp. 88–94. (In Russian).
2. Viktorov S.D., Galchenko Yu.P. Nano-sized particles in the mineral resource exploitation: formation of transit and deposition in the earth's atmosphere. *Inzhenernaja fizika* [Engineering Physics], 2018, no. 7, pp. 43–50. (In Russian).
3. Cheban A.Yu. Production Complex for Open-Cast Mining of Solid Minerals. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2017, no. 3, pp. 8–11. (In Russian).
4. Kumar C., Murthy V., Kumaraswamidhas L., Prakash A. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength – Some investigations. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2016, vol. 64, pp. 181–186.
5. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. *Russia. Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, pp. 18–19.
6. Prakash A., Murthy V., Singh K. Rock excavation using surface miners: An overview of some design and operational aspects. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, pp. 33–40.
7. Niemann-Delius C. Mining technical and profitability of Continuous Surface Mining for two open-pit coal mines in Yugoslavia based on Krupp Surface Mining. *Braunkohle*, 1991, no. 11, pp. 24–27.
8. Glotov V.V. On investment attractiveness of small deposits of minerals. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2003, no. 10, pp. 101–104. (In Russian).
9. Romashkin Yu.V. Final extraction of open pit coal field resources. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2012, no. 10, pp. 70–74. (In Russian).
10. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Furin V.O. Justification for technological parameters of deepening complex. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2011, no. 9, pp. 2–10. (In Russian).
11. Cheban A.Yu. Method of developing deep-career with application of milling machines. *Markshejderija i nedropol'zovanie* [Mine Surveying and Subsurface Use], 2017, no. 4, pp. 23–29. (In Russian).
12. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>. (In Russian).

Критерии авторства

Чебан А.Ю. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Cheban A.Yu. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.272

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-97-106>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© А.М. Павлов^а, А.А. Федоляк^б

^{а,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: Жильные месторождения золота Восточной Сибири находятся в труднодоступных районах с суровым резко континентальным климатом и характеризуются сложными условиями геологической среды, что негативно влияет на рентабельность производства. Задача повышения эффективности подземной добычи руд при разработке данных месторождений является актуальной. Целью проводимых исследований стало решение задачи по повышению эффективности разработки жильных месторождений золота. Методы исследований базируются на глубоком изучении условий залегания золоторудных тел и геомеханического состояния массива горных пород с применением натуральных наблюдений и измерений, математического моделирования, лабораторных и промышленных испытаний. В результате этого был обоснован и предложен порядок отработки наклонных золотосодержащих жил в технологически выделенных контурах запасов с разделением на зоны производства работ (рабочая, зачистки, локализации) с последующим погашением пустот регулируемым обрушением. При внедрении данной технологии впервые на золоторудных месторождениях России была применена взрывозащищенная гидравлическая крепь и вакуумная зачистка руды. Для эффективной выемки крутопадающих жил была создана конструкция гибкой системы расположения буровых штреков при подэтажной системе разработки. Массив горных пород закреплялся с буровых штреков. Крепление пород производилось в комбинации с канатными анкерами. Это позволило эффективно осуществлять добычу руды в неустойчивых породах. Балансовые запасы тонких крутопадающих жил предложено обрабатывать с подэтажной отбойкой руды с нисходящим порядком щелевой выемки и опорным креплением. Проведенные работы по совершенствованию технологии разработки жильных месторождений позволили рудникам значительно снизить издержки по производству металла.

Ключевые слова: жильные месторождения, геологическая среда, геомеханическое состояние массива, дискретность, технологический контур, криолитозона, геотехнология, система разработки

Информация о статье: Дата поступления 1 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 3 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Павлов А.М., Федоляк А.А. Повышение эффективности подземной разработки золоторудных месторождений Восточной Сибири. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2018;41(4):97–106. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-97-106.

^аПавлов Александр Митрофанович, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Института недропользования, тел.: 8 (3952) 405104, e-mail: go_gor@istu.edu
Alexander M. Pavlov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Mineral Deposits Development of the Institute of Subsoil Use, tel.: 8 (3952) 405104, e-mail: go_gor@istu.edu

^бФедоляк Александр Алексеевич, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Института недропользования, тел.: 8 (3952) 405104, e-mail: go_gor@istu.edu
Alexander A. Fedolyak, Postgraduate student of the Department of Mineral Deposits Development of the Institute of Subsoil Use, tel.: 8 (3952) 405104, e-mail: go_gor@istu.edu

IMPROVING EFFICIENCY OF GOLD DEPOSIT UNDERGROUND MINING IN EASTERN SIBERIA

© Alexander M. Pavlov^a, Alexander A. Fedolyak^b

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT: Vein deposits of gold in Eastern Siberia are located in remote areas with a severe sharp-continental climate and are characterized by complex conditions of geological environment. This fact jeopardises the profitability of production. The task of increasing the efficiency of ore underground mining in the development of these deposits is relevant. The purpose of the conducted researches is to solve the problems of improving the development efficiency of vein gold deposits. Research methods are based on the profound study of gold ore body occurrence conditions and the geomechanical state of the rock massif using field observations and measurements, mathematical modeling, laboratory and industrial tests. As a result of this, the mining order of inclined gold-bearing veins in technologically separated contours of reserves with the division into production zones (working, stoping, localization) and subsequent backfilling of voids by controlled caving was substantiated and proposed. When this technology was introduced in Russian gold mines, an explosion-proof hydraulic support and vacuum stoping of ore were used for the first time. A structure of the flexible system of stope drift location has been created for a sublevel development system in order to provide the effective excavation of steeply dipping veins. The rock massif was supported from stope drifts. The rocks were supported using rope anchors. This enabled the effective extraction of ore in unstable rocks. It is proposed to mine the balance reserves of thin steeply dipping veins by sublevel ore breaking with combined overhand-underhand stoping and support work. The carried out works directed at the improvement of the development technology of vein deposits allowed significant reduction in the costs of metal production at the mines.

Keywords: vein deposits, geological environment, geomechanical state of the massif, discreteness, technological contour, cryolithozone, geotechnology, development system

Information about the article: Received November 1, 2018; accepted for publication December 3, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Pavlov A.M., Fedolyak A.A. Improving efficiency of gold deposit underground mining in Eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2018;41(4):97–106 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-97-106.

Введение

Золоторудные месторождения Бурятии залегают в сложных условиях геологической среды горного ландшафта Восточных Саян и отрогов Муйского хребта. Основным характеризующим фактором сложности является изменчивость параметров, характеризующих эту среду в пределах выемочной единицы [1, 2]. Рассмотрим основные из них:

- рудное тело изменчиво по мощности, с отходящими апофизами;
- углы залегания меняются по падению и простиранию, а следовательно, и рельеф кровли или боков рудного тела варьирует сменой направления с чередо-

ванием прогибов (синклиналей) и куполов (антиклиналей);

- имеются зоны расщепления во вмещающих породах, которые копируют форму рельефа кровли и изменчивы по мощности;

- интенсивность трещиноватости руд и пород может меняться от малой до высокой, что является причиной изменений устойчивости обнажений массива горных пород;

- в условиях криолитозоны присутствует знакопеременная температура массива горных пород и атмосферы шахтного поля, существуют участки с переходными зонами;

– содержание металла в руде крайне не выдержано и имеет дискретный характер распределения, значения чередуются от богатых до убогих и пустых, породных участков [3–7].

Все вышеперечисленные параметры характеризуют геологическую среду как сложную по строению и устойчивости и непосредственно затрудняют процессы отработки эксплуатационных запасов блока, что влечет за собой высокие экономические потери бизнеса. Для выполнения поставленной задачи по повышению эффективности освоения коренных месторождений золота был разработан алгоритм ее решения.

Методы исследований

На основе данных, полученных в результате изучения геологической среды, производится следующее:

– определение значений природных напряжений по данным натурных измерений методом щелевой разгрузки и решения обратных геомеханических задач, выявление направления главного напряжения [8];

– районирование массива пород криолитозоны на области, различающиеся устойчивостью при знакопеременном температурном состоянии шахтного поля, на основе методики измерения температуры пород;

– картирование пород и руд шахтного поля по устойчивости с использованием в качестве ключевого метода интенсивности трещиноватости пород массива;

– построение технологического контура эксплуатационных запасов блока с учетом фрактальных свойств распределения металла на основе разработанной методики технологического оконтуривания;

– обоснование параметров систем разработки с использованием математического моделирования.

Таким образом, с учетом данного комплексного подхода в дальнейшем

разрабатывался порядок технологии добычи руды по критериям, подходящим по горно-геологическим условиям, безопасности и экономической эффективности [9–11].

Для упрощения были приняты ключевые решения:

– разделить очистной блок на участки, обрабатываемые в системе автономно с учетом изменения условий геологической среды;

– время стояния отработанного пространства свести к минимуму.

Благодаря такому подходу были решены задачи повышения эффективности ведения очистных работ на ряде рудников Восточной Сибири.

Результаты исследований

Так, например, золоторудное месторождение Зун-Холбинское, расположенное в Восточных Саянах, представляет собой маломощные и средней мощности крутопадающие рудные тела жильного типа со сложной морфологией. Руды средней устойчивости, породы при обнажении находятся в неустойчивом состоянии. Золото в руде распределяется крайне неравномерно и дискретно, порой не имеет четких контуров. Добыча руды ведется на больших глубинах – до 900 м от поверхности. Для сложных условий разработки месторождения вместо дорогостоящей и трудоемкой слоевой системы разработки с твердеющей закладкой и креплением были обоснованы параметры и обеспечено внедрение системы разработки со скважинной отбойкой с поэтажей (буровых штреков) и магазинированием руды.

Оконтуривание запасов очистного блока в пределах этажа производилось по специально разработанной методике технологического оконтуривания эксплуатационных запасов, учитывающей фрактальные свойства распределения металла в руде [3].

Система расположения буровых штреков в местах изменения углов

залегания позволяет произвести качественное оконтуривание забоя при скважинной отбойке, тем самым свести разубоживание к минимуму (рис. 1). Для того чтобы удержать борта от обрушения в очистной камере, подэтажи (буровые штреки) крепятся анкерами, а затем, после анкерной прошивки массива пород, производится закрепление бортов через траверсы (штрипсы) канатными анкерами [3, 12].

На основе полученных данных о геомеханическом состоянии массива горных пород месторождения было произведено математическое моделирование, в результате которого установлено, что толщина зоны растягивающих напряжений в бортах очистной камеры не превышает 3–3,5 м. Следовательно, длина анкеров с учетом необходимости их зацепления за нетронутый массив составляет не менее 4–5 м. Проведенные натурные

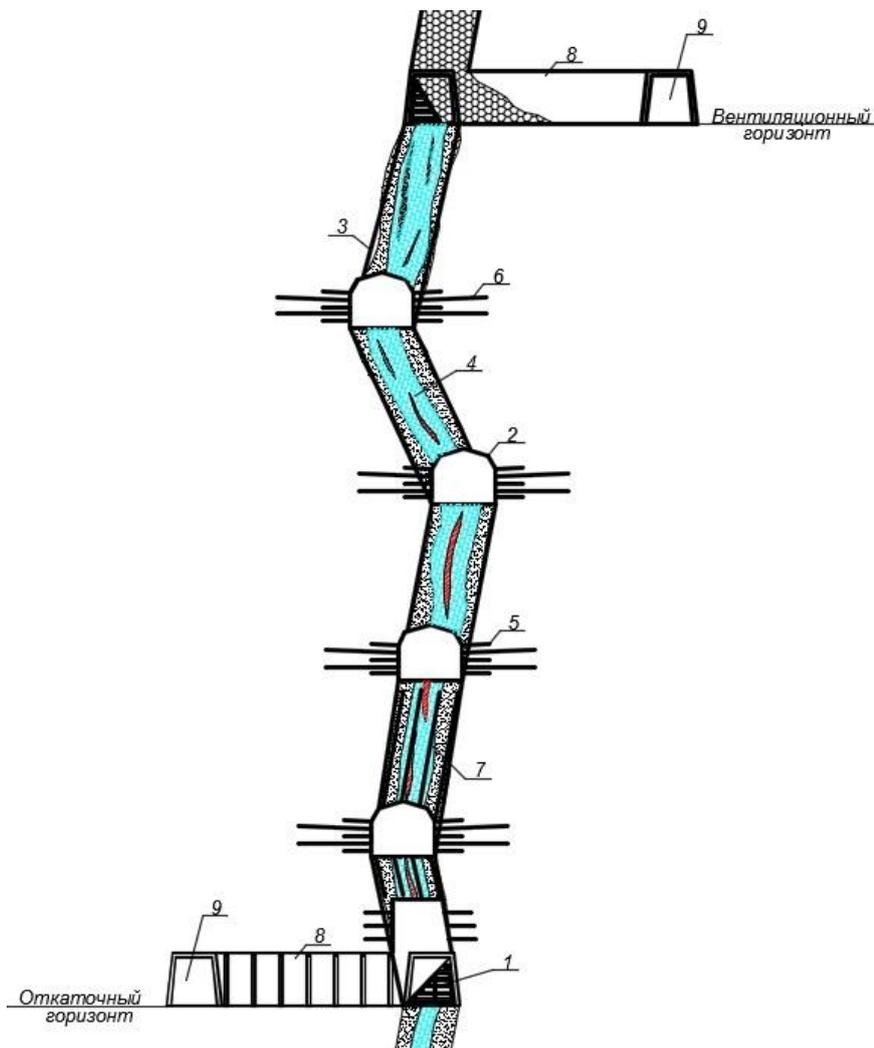


Рис. 1. Расположение подэтажей (буровых штреков):

1 – днище блоков; 2 – буровой штрек; 3 – выемочный контур; 4 – рудное тело;
5 – сталеполимерный анкер; 6 – тросовой анкер; 7 – скважина;
8 – орт-заезд; 9 – полевой штрек

Fig. 1. Location of sublevels (stope drifts):

1 – block bottom; 2 – stope drift; 3 – extraction contour; 4 – ore body;
5 – steel polymer anchor; 6 – cable anchor; 7 – well;
8 – access crosscut; 9 – fringed drift

наблюдения при отработке опытных блоков подтвердили, что обрушение вмещающих пород с боков после времени стояния блока 50 суток произошло на глубину не более 3 м.

Время устойчивого стояния бортов очистной камеры до начала процесса обрушения t_{cm} определяется как суммирование времени процесса отбойки $t_{отб}$ и времени процесса выпуска руды $t_{вып}$. В зависимости от количества закрепленных подэтажей получаем время устойчивого стояния бортов очистной камеры блока

$$t_{cm} = t_{отб} + t_{вып} = \frac{K_{эмп} \cdot h_p}{\gamma \cdot L_э^2} \cdot \sqrt{\frac{n}{4}},$$

где $K_{эмп}$ – эмперический коэффициент; h_p – мощность разрушения слоя пород, м; γ – объемный вес пород, Мн/м³; $L_э$ –

величина эквивалентного пролета камеры, м; n – количество поясов крепления.

Мощность слоя h_p устанавливается исходя из пространственного положения растягивающих напряжений в бортах камер на различной глубине разработки. Расчеты и математическое моделирование выявили зависимость, при которой с уменьшением размера очистной камеры по простиранию время ее стояния с магазинированной рудой до ее выпуска увеличивается (рис. 2).

Таким образом, путем подбора размеров очистной камеры и конструктивных параметров системы расположения буровых выработок, выполняющих роль поясов крепления, удалось временно удерживать вмещающие породы бортов блока от обрушения на период отбойки и выпуска руды.

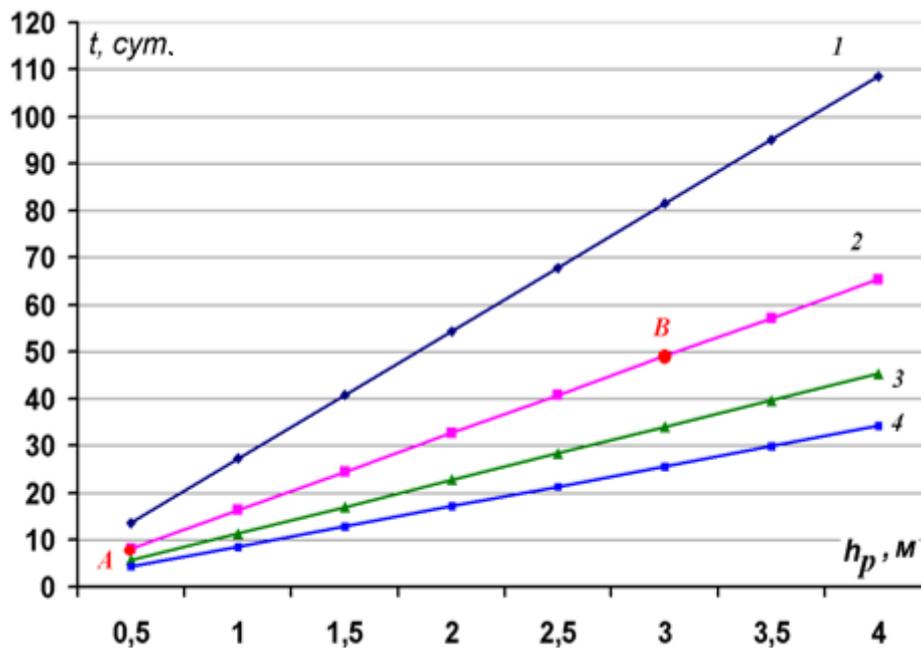


Рис. 2. График зависимости времени устойчивого состояния очистной камеры t от глубины крепления бортов при четырех поясах крепления

Ширина камеры: 1 – 15 м; 2 – 20 м; 3 – 25 м; 4 – 30 м

Для точек А и В фактически установлено время стояния ряда отработанных камер на руднике

Fig. 2. Dependence graph of slope steady state time t on the depth of side support with four support bands:

Stope width 1 – 15 m; 2 – 20 m; 3 – 25 m; 4 – 30 m

Time period of dead stopes being abandoned at the mine is determined for the points A and B

Производственные испытания предложенной системы разработки на Зун-Холбинском золоторудном месторождении в опытных блоках показали, что возможно уменьшить потери руды на 20 %, повысить производительность отбойки запасов блока в три раза и снизить себестоимость добычи руды в два раза по сравнению с применяемой слоевой системой разработки с твердеющей закладкой и креплением.

На золоторудном месторождении Коневинском, находящемся также в Восточных Саянах, ведется отработка крутопадающих тонких жил системой с магазинированием руды в условиях многолетней мерзлоты. Характерной особенностью рудных тел является невыдержанность по элементам залегания и крайне неравномерное распределение содержания в руде. Основным недостатком применяемой системы разработки является повышенное разубоживание – 67 % при средней мощности жилы 0,4 м, что приводит к нерентабельной добыче руды.

Исследования показали, что помимо сверхнормативного прихвата боковых пород разубоживание увеличивается за счет отбойки породных участков и участков убогой руды при сплошной выемке запасов. В ходе анализа площадей отработанных блоков обнаружено, что площадь убогой руды с содержанием металла менее 1 г/т составляет в среднем 15 %. Присутствующая субпараллельная и секущая система трещин в массиве вмещающих пород способствует развитию вторичного разубоживания после производства взрывных работ. Наличие отрицательной температуры практически не противостоит данному виду нарушения устойчивости боковых пород, но влияет на смерзание отбитой руды. При обосновании параметров геотехнологии добычи руды расчеты и математическое моделирование показали, что массив в целом устойчив и не склонен к обрушениям при пролетах до 100 м (двух

этажей) при ширине блока 50 м, что подтверждается опытом отработки при отрицательных температурах и глубинах до 300 м. Отслоению подвержена приконтактная часть пород мощностью не более 0,5 м. Исходя из этого, пришли к выводу, что технология очистной выемки руды должна осуществляться с исключением из процесса отбойки руды участков породы и убогой руды, при этом необходимо максимально возможно снизить мощность очистного пространства, не допустив вторичного разубоживания. Для соблюдения таких условий был разработан порядок отработки балансовых запасов уступным забоем по простиранию с нисходящей выемкой и опорным креплением подэтажей [12]. Обоснованы конструктивные параметры данной системы разработки. Подэтажные штреки проходят сечением 2,4×0,8 м через 5,6 м. Боковые породы по кровле подэтажа крепятся анкерами через стрипсы, что препятствует разрушению пород при щелевой отбойке коротких уступов.

Такой порядок ведения очистных работ позволяет оставлять забалансовые участки и не исключает возможности выборочной отбойки руды с оставлением породы в блоке. Для защиты от возможных обрушений боковых пород, расположенных по восстанию, в отработанном пространстве предусматривают заградительную бутовую полосу.

Предложенная технология была испытана в опытных блоках с положительным эффектом. Применение данной системы разработки позволит улучшить качество добываемой руды в два раза, при этом достичь производительности труда горнорабочего по отбойке жильной массы в смену не менее, чем с системой с магазинированием руды, и в целом снизить издержки по производству металла на 29 %.

Ирокиндинское золоторудное месторождение наклонного залегания жильного типа расположено в многолет-

немерзлых породах Южно-Муйского хребта. Вмещающие породы представлены зонами рассланцевания, склонными к обрушению. Добыча руды осуществляется камерно-столбовой системой с креплением, основным недостатком которой являются большие потери руды в целиках и на почве очистного блока. На момент проведения исследований по совершенствованию геотехнологии были оставлены большие площади шахтного поля с неотработанными запасами в целиках, равными двум годовым планам по добыче руды, кроме того содалась угроза неуправляемого обрушения кровли при выемке целиков. Назрела необходимость разработки технологии добычи руды из балансовых целиков и отработки запасов без оставления целиков. Проведенное исследование выявило, что допустимый пролет обнажения кровли может достигать 50 м, а напряжение в целиках меньше допустимого. Стало понятно, что целики служат только для поддержания зоны рассланцевания, мощность которой не превышает 1 м. Анализ потерь руды показал, что в подошве очистного пространства происходит наморозка рудной мелочи и ее заглаживание в процессе доставки, тем самым создается мнимое видение чистого контакта с вмещающими породами. Оказалось, что фактические потери отбитой руды в почве блока в три раза больше нормативных.

На основании проведенных исследований было выполнено обоснование параметров сплошной системы разработки, при которой добыча руды производилась широким забоем по простиранию с креплением. Данный порядок ведения процессов очистных работ позволяет производить также выемку целиков с локализацией отработанного пространства. В основе технологии заложен порядок выемки запасов, который позволяет не накапливать отработанные площади в выемочном блоке. Для этого эксплуата-

ционный участок блока (подэтаж) разделяется на три зоны: первая – отбойки, крепления и доставки, вторая – вакуумной зачистки руды, третья – локализации пустот (рис. 3).

В качестве поддержания очистного пространства вместо целиков была применена взрывозащищенная гидрокрепь, с помощью которой поддерживалась зона рассланцевания. Для зачистки подошвы блока от рудной мелочи было предложено использовать вакуумную технологию. Для этой цели применили вакуумные установки производства ЮАР, позволяющие транспортировать рудную мелочь размером до 50 мм по трубам до места погрузки на расстояние до 50 м [3]. После окончания процесса зачистки гидрокрепь демонтировалась в отступающем порядке и использовалась в рабочей зоне, а незакрепленная зона локализовалась посредством ограждения или ее погашения. Разработанный порядок позволил улучшить условия промышленной безопасности и охраны труда за счет исключения накопления больших площадей пустот и своевременной их локализации.

Предлагаемая система разработки прошла промышленные испытания на Ирокиндинском месторождении. Ее применение в опытных блоках обеспечило повышение производительности труда в 1,5 раза, потери полезного ископаемого при добыче сокращены с 9 % плановых до 3 % фактических. В дальнейшем с использованием предложенной технологии была решена проблема добычи руды из оставленных целиков в отработанных блоках с погашением пустот.

Выводы

Проведенные данные исследования по совершенствованию технологии подземной разработки жильных золоторудных тел в сложных условиях геологической среды для ряда высокогорных месторождений Восточной Сибири позволили обосновать эффективные

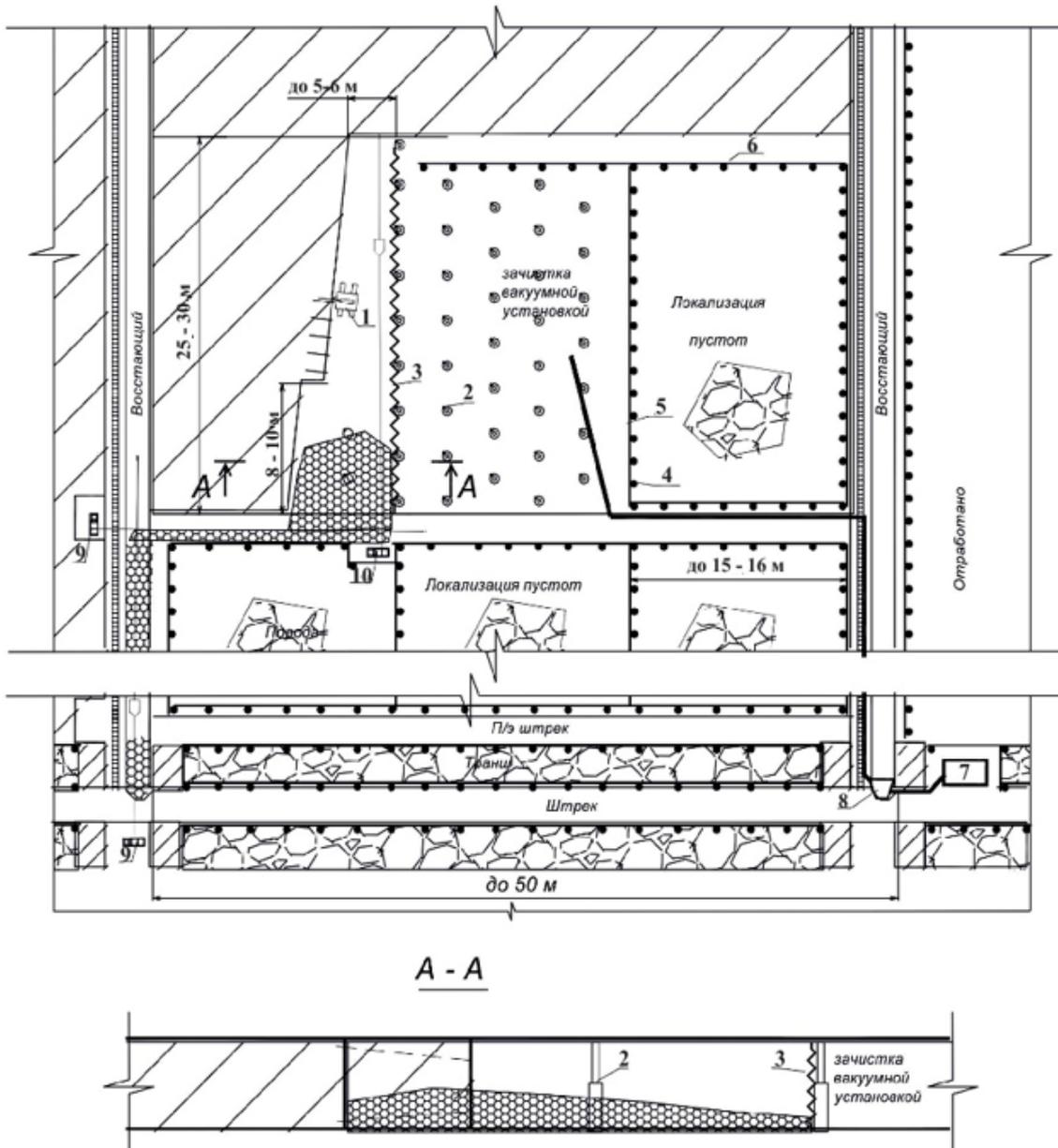


Рис. 3. Расположение зон ведения добычи руды

1 – буровой станок на санях; 2 – гидравлическая стойка; 3 – экран (полимерная сетка);
4 – распорная стойка; 5 – дощатый отшив; 6 – отшив скреперной дорожки; 7 – вакуумная установка;
8 – сепаратор; 9 – скреперная лебедка 30ЛС-2с; 10 – скреперная лебедка 10ЛС-2с

Fig. 3. Location of ore mining zones

1 – sliding drilling machine; 2 – hydraulic prop; 3 – screen (polymer mesh);
4 – anchor prop; 5 – fenced-off boardwalk; 6 – fenced-off scraper path; 7 – vacuum unit;
8 – separator; 9 – scraper hoist 30LS-2s; 10 – scraper hoist 10LS-2s

параметры систем разработки месторождений золота, в результате чего повысить производительность труда и снизить себестоимость добычи металла, при этом улучшить условия труда горнорабочих очистного забоя. Результаты внедре-

ния предложенных технологий отработки запасов показали, что производственные издержки по добыче руды сокращались до 30 % по сравнению с применяемыми системами разработки.

Библиографический список

1. Галченко Ю.П., Сабянин Г.В. Проблемы геотехнологии жильных месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2011. 367 с.
2. Назарчик А.Ф., Олейников И.А., Богданов Г.И. Разработка жильных месторождений. М.: Недра, 1977. 240 с.
3. Павлов А.М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 128 с.
4. Курсакин Г.А. Технология разработки золоторудных жильных месторождений. Владивосток: Дальнаука, 2002. 237 с.
5. Шевченко А.Е., Пирогов Г.Г. Совершенствование системы разработки Ново-Широкинского месторождения подэтажными штреками // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 357–363.
6. Тальгамер Б.Л., Снетков В.И. Основные тенденции изменения качества и достоверности запасов золота в Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 6 (49). С. 51–56.
7. Pires D. Mineral project evaluation // Mine Management Bulletin. October 2012. P. 30–32.
8. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.
9. Павлов А.М., Васильев Д.С. Влияние геологической среды на качество добываемой руды Коневинского месторождения // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57). С. 83–90.
10. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 60. P. 345–352.
11. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading // 7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 13–15 May 2013. Perth, 2013. P. 221–233.
12. Павлов А.М., Васильев Д. С. Повышение эффективности подземной разработки тонких крутопадающих жил // Горная Промышленность. 2017. № 1 (131). С. 86–87.

References

1. Galchenko Yu.P., Sabyanin G.V. *Problemy geotekhnologii zhill'nykh mestorozhdenii* [Problems of vein deposit geotechnology]. Moscow: Nauchtehlitizdat Publ., 2011, 367 p. (In Russian).
2. Nazarchik A.F., Oleinikov I.A., Bogdanov G.I. *Razrabotka zhill'nykh mestorozhdenii* [Development of vein-type deposits]. Moscow: Nedra Publ., 1977, 240 p. (In Russian).
3. Pavlov A.M. *Sovershenstvovanie tekhnologii podzemnoi razrabotki zhill'nykh mestorozhdenii zolota* [Improving the technology of underground mining of vein-type gold deposits]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2013, 128 p. (In Russian).
4. Kursakin G.A. *Tekhnologiya razrabotki zolotorudnykh zhill'nykh mestorozhdenii* [Development technology of gold-ore vein deposits]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2002, 237 p. (In Russian).
5. Shevchenko A.E., Pirogov G.G. Improvement of the system development

Novo-Shirokinskogo field sublevel drifts. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2016, no. 7, pp. 357–363. (In Russian).

6. Tal'gamer B.L., Snetkov V.I. Main tendencies of gold reserve quality and reliability change in Eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 6 (49), pp. 51–56. (In Russian).

7. Pires D. Mineral project evaluation. *Mine Management Bulletin*, October 2012, pp. 30–32.

8. Vlokh N.P. *Upravlenie gornym davleniem na podzemnykh rudnikakh* [Mining pressure control in underground mines]. Moscow: Nedra Publ., 1994, 208 p. (In Russian).

9. Pavlov A.M., Vasil'ev D.S. The effect of geological environment on Konevinskoe deposit ore quality. *Izvestiya Sibir-*

skogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 4 (57), pp. 83–90. (In Russian).

10. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, vol. 60, pp. 345–352.

11. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading. 7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 13–15 May 2013. Perth, 2013, pp. 221–233.

12. Pavlov A.M., Vasil'ev D.S. Enhancing the efficiency of underground mining of steeply dipping thin veins. *Gornaya Promyshlennost'* [Mining Industry], 2017, no. 1 (131), pp. 86–87. (In Russian).

Критерии авторства

Павлов А.М., Федоляк А.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Pavlov A.M., Fedolyak A.A. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.248.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-107-117>

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОГЛОЩЕНИЙ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ БУРЕНИИ В ИНТЕРВАЛАХ ТРАППОВЫХ ИНТРУЗИЙ

© Н.Н. Мартынов^а, В.Г. Заливин^б

^{а,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: Цель данного исследования заключалась в разработке технологии и технических средств для ликвидации поглощений бурового раствора различной интенсивности в трещиноватых и кавернозных породах в зонах провала бурового инструмента и зияющих трещинах с обеспечением при этом полного и качественного перекрытия интервалов водоносных горизонтов, а также закрепления стенки скважины от их разупрочнения. В работе использовались методы анализа горно-геологических условий бурения скважин на нефть и газ на территории Непско-Ботуобинской антеклизы, обеспечивающих поглощения бурового раствора различной степени интенсивности и перепадов пластового и забойного давлений, а также сравнительная оценка качества изоляции зон ухода бурового раствора, затрат времени и материалов на их ликвидацию, предотвращение осыпей, обвалов, прихватов бурильного инструмента вследствие заклинивания его обломками трещиноватых пород. В результате были исследованы технологии, применяемые на Среднеботуобинском газоконденсатном месторождении при проведении тампонажных работ, оценена эффективность различных способов и методик в условиях наличия в скважинах интервалов трещиноватых и неустойчивых пород, проанализированы их достоинства и недостатки. На основе этого разработан альтернативный способ ликвидации поглощений любой интенсивности при избыточном давлении на зону трещиноватых пород, который заключается в воздействии на каналы поглощений полимерами, затвердеваемыми при контакте с пластовой водой и значительном увеличении объема полиминерализованной смеси, при этом обеспечивается проникновение смеси в каналы поглощений за счет объемного расширения полимера с повышением устойчивости стенок скважины. В качестве полимера предложен гидроактивный пенополиуретан. Разработан погружной контейнер, позволяющий доставлять полимер непосредственно в зону поглощений. Разработанный метод доставки тампонажной смеси непосредственно в зону поглощений и применение расширяемых полимеров позволили повысить цикловую скорость бурения, сократить расход тампонажных материалов, улучшить культуру и экологичность производства при проведении изоляционных работ и сократить сроки сооружения скважины.

Ключевые слова: бурение, ликвидация поглощений, полиуретан, погружной контейнер

Информация о статье: Дата поступления 7 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 18 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Мартынов Н.Н., Заливин В.Г. Технология ликвидации поглощений бурового раствора при бурении в интервалах трапповых интрузий. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):107–117. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-107-117.

^аМартынов Николай Никитович, аспирант кафедры нефтегазового дела Института недропользования, e-mail: martynovkoma@gmail.com

Nikolay N. Martynov, Postgraduate (student) of the Department of Oil and Gas Engineering of the Institute of Subsoil Use, e-mail: martynovkoma@gmail.com

^бЗаливин Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования, e-mail: zalivinvg@yandex.ru

Vladimir G. Zalivin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering of the Institute of Subsoil Use, e-mail: ZalivinVG@yandex.ru

TECHNOLOGY TO ELIMINATE ABSORBING OF DRILLING SOLUTION WHEN DRILLING WITHIN THE RANGE OF TRAPPEAN INTRUSIONS

© Nikolay N. Martynov^a, Vladimir G. Zalivin^b

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the study is to develop a technology and technical means for the elimination of drilling mud losses of various intensity in faulted and cavernous rocks in the sinking zones of a drilling tool and open fractures while ensuring complete and efficient cut-off of water horizon intervals as well as borehole wall consolidation against weakening. The study uses the methods of the analysis of mining and geological conditions of oil and gas well drilling on the territory of Nepa-Botuoba anticline featuring the drilling mud absorption of various intensity and drops of reservoir and bottomhole pressures, as well as a comparative estimation of the insulation quality of drilling mud loss zones, of time and material consumption for their elimination, prevention of ramble, caving, drilling tool sticking resulting from its jamming by the fragments of fractured rocks. As a result the technologies used at the SredneBotuoba gas-condensate field when performing plugging operations have been studied. The efficiency of various methods and techniques, in the presence of intervals of fractured and unstable rocks in the wells has been estimated. Their advantages and disadvantages have been analyzed. On the basis of all these, the authors have developed an alternative method to control drilling mud losses of any intensity under the excessive pressure on the zone of fractured rocks. The method involves influencing the absorption channels by the polymers that solidify upon the contact with the formation water and significant increase in the volume of the mineralized mixture. This allows the mixture to penetrate into the absorption channels due to the polymer volume expansion and increase of borehole wall stability. Hydroactive polyurethane foam is proposed as a polymer. An immersion pod has been developed that allows the polymer to be delivered directly to the absorption zone. The developed method of delivering the grouting mixture directly to the absorption zone and the use of expandable polymers made it possible to increase the cyclic drilling rate, reduce the consumption of grouting materials, improve the culture and environmental friendliness of production during insulation works as well as shorten the time of well construction.

Keywords: drilling, drilling mud loss control, polyurethane, immersion pod

Information about the article: Received November 7, 2018; accepted for publication December 18, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Martynov N.N., Zalivin V.G. Technology to eliminate absorbing of drilling solution when drilling within the range of trappean intrusions. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2018;41(4):107–117 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-107-117.

Введение

Одним из самых часто встречаемых осложнений при бурении скважин на объектах Восточной Сибири являются поглощения бурового раствора, которые составляют 90–95 % всех видов осложнений в этом регионе [1]. Поглощение – это гидродинамическое взаимодействие в системе «скважина – пласт», сопровождающееся поступлением бурового

или тампонажного раствора из скважины в пласт с интенсивностью и осложняющее дальнейшую проводку скважины.

Поглощения вызваны наличием в горных породах проницаемых каналов (например, трещин, пустот, каверн)¹. Основная причина поглощений заключается в превышении давления в скважине над пластовым давлением или над суммой пластового и начального градиентов

¹ Калинин А.Г., Левицкий А.З., Никитин Б.А. Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ: учебник для вузов. М.: Недра, 1998. 440 с. / Kalinin A.G., Levitskiy A.Z., Nikitin B.A. Technology of drilling oil and gas exploration wells: university textbook. Moscow: Nedra, 1998. 440 p.

давлений. Это происходит вследствие излишней плотности бурового или тампонажного раствора и больших потерь напора в кольцевом пространстве при бурении или цементировании колонн в высокопроницаемых коллекторах большой емкости или в интервалах образования трещин гидравлического разрыва пластов [2].

Поглощающими горизонтами в большинстве случаев являются горизонты трещиноватой, кавернозной или крупнозернистой структуры с низкими градиентами пластового давления. Эти горизонты могут быть нефтеносными и газоносными, но чаще всего они водоносны. Трещины в пласте могут образовываться как в результате перекристаллизации пород, так и вследствие тектонических процессов. Раскрытость трещин изменяется в широких пределах – от полного смыкания до 40–50 мм. Размер трещин со временем изменяется под действием природных и искусственных факторов. Можно выделить три категории интенсивности поглощений: поглощения малой интенсивности (до 10–15 м³/ч), средней интенсивности (до 40–60 м³/ч) и высокоинтенсивные (более 60 м³/ч).

Цель исследования заключается в разработке технологии и технических средств для ликвидации поглощений бурового раствора в зонах трещиноватых трапповых интрузий на территории Непско-Ботуобинской антеклизы на примере Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения. При этом необходимо обеспечить полное и качественное перекрытие интервалов поглощений, снизить затраты времени на ликвидацию осложнений и сооружение скважины.

Методы исследования

Одним из самых распространенных способов ликвидации зон частичных поглощений считается кольматирование этих горизонтов. Поглощения бурового раствора средней интенсивности можно избежать посредством использования быстросхватывающих смесей на основе смол и цементных смесей с добавками ускорителей схватывания². Высокоинтенсивные поглощения принято ликвидировать установкой изоляционных цементных мостов, профильных перекрывателей (локальной обсадной колонной, изолирующей зону поглощения с потери диаметра ствола скважины) [3].

Предупреждение и ликвидация осложнений в скважинах, связанных с потерей циркуляции бурового раствора, закрепление неустойчивых стенок скважин, а также работы по созданию искусственных мостов проводились в основном с применением тампонажных смесей на основе цемента.

Однако при всех положительных сторонах использования тампонажных смесей на основе цемента их применение неэффективно, поскольку они имеют длительные сроки схватывания, большие радиусы растекания, чувствительны к температурным режимам и наличию глинистой корки и смазки на стенках скважины, снижающих адгезию при их контакте с горной породой.

Опыт бурения скважин на Среднеботуобинском месторождении показал, что поглощение начинается при вскрытии трапповой интрузии в интервалах от 1050 до 1350 м (при мощности пластов 300–350 м). Механическая скорость бурения в этом интервале в среднем составляет до 3 м/ч, что связано с высокой твердостью пород – IX–X категории по буримости [4]. При вскрытии этого ин-

² Заливин В.Г. Осложнения при бурении нефтегазовых скважин: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 247 с. / Zalivin V.G. Complications in drilling oil and gas wells: learning aids. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2013. 247 p.

тервала без проведения изоляционных работ наблюдаются следующие осложнения: осыпи, обвалы, подклинка буровой колонны, прихваты бурового инструмента и поглощения бурового раствора³.

В процессе бурения скважин в пределах исследуемого интервала опытным путем применялись различные методы и способы для сокращения времени, затраченного на прохождение интервала трапповой интрузии. Наиболее часто производили замену бурового раствора на техническую воду, так как скважина интенсивно поглощала буровой раствор и его не успевали заготавливать в нужных объемах для продолжения дальнейшего цикла бурения, периодически прокачивая пачки структурированного глинистого раствора (5–10 м³) для удаления шлама выбуренных пород. Объем поглощения технической воды доходил до 2000 м³ при полной пористости пород 25 % и проницаемости более 300 мД. При этом имели место непроизводительные затраты времени на набор технической воды в приемные емкости, уменьшение механической скорости бурения и дополнительное увеличение финансовых затрат.

Бурение без выхода циркуляции можно осуществлять и на технической воде. Но в этом случае при отсутствии структуры естественный буровой раствор не удерживает шлам во взвешенном состоянии, в результате чего выбуренная порода оседает на забое, образуя шламовую подушку, обуславливая прихваты бурового инструмента и снижение скорости бурения.

Использовались роторные компоновки для прокачки кольматационных пачек различного состава, разной наполняемости и условной вязкости рас-

твором вплоть до состояния «не течет» по вискозиметру СПВ-5. В компоновку низа буровой колонны добавлялись циркуляционные переводники [5], позволяющие прокачивать кольматационные пачки более высокой концентрации. Эффективных результатов при бурении скважин эти методы не дали.

Опытным путем выявлен наиболее эффективный метод прохождения интервала трапповой интрузии – это установка цементных мостов [6], однако он обладает рядом недостатков.

В качестве примера проанализируем процесс бурения скважины на Среднеботуобинском месторождении по графику зависимости глубины бурения h от времени t . На рис. 1 цифрами указаны этапы бурения скважины и ее осложнения. Цифрами 1–4 на графике отмечены интервалы, в которые строительство скважины продолжается в штатном режиме. При бурении под эксплуатационную колонну ОК-178 мм на глубине 1217 м отмечено поглощение бурового раствора интенсивностью 24 м³/ч с последующей потерей циркуляции. Скважина переводится на техническую воду. Производится подъем компоновки низа буровой колонны и спуск колонны буровых труб для установки цементного моста № 1. При его установке циркуляция отсутствует, но во избежание прихвата бурового инструмента произошло ожидание затвердевания цемента не менее 16 ч (инт. 5 на рис. 1). Далее производилась спускоподъемная операция по спуску роторной компоновки низа буровой колонны на бурение. На глубине 1266 м происходила полная потеря циркуляции (инт. 6 на рис. 1), компоновка поднималась, и спускался буровой инструмент для установки цементного моста № 2. После продавки цемента

³ Заливин В.Г. Аварии при бурении нефтегазовых скважин: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 278 с. / Zalivin V.G. Accidents at drilling oil and gas wells: learning aids. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2015. 278 p.

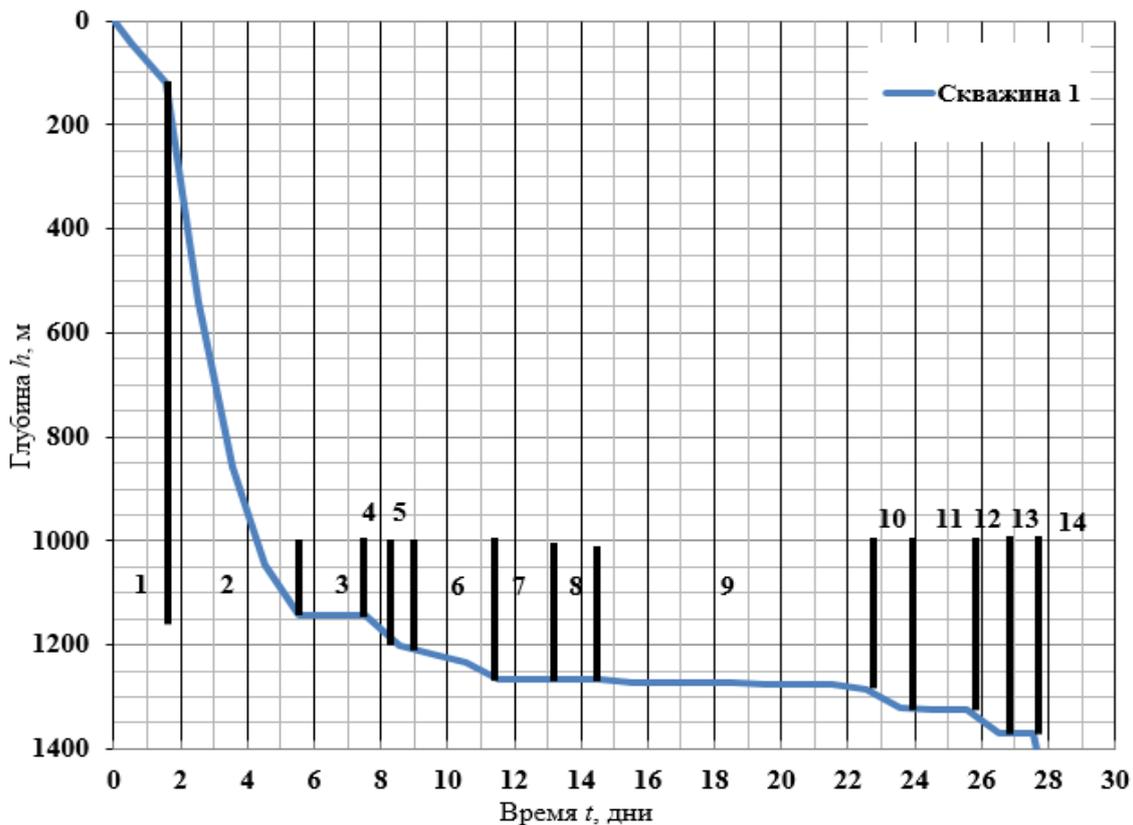


Рис. 1. График бурения скважины 1

с основными этапами строительства и проводимыми операциями:

- 1 – бурение, спуск ОК-324 мм, цементирование ОК-324 мм; 2 – бурение; 3 – спуск ОК-245 мм, цементирование ОК-245 мм, ожидание затвердевания цемента; 4 – бурение; 5 – спускоподъемная операция, установка цементного моста № 1, ожидание затвердевания цемента; 6 – спускоподъемная операция, бурение; 7 – спускоподъемная операция, установка цементного моста № 2, ожидание затвердевания цемента, прокачка кольматационных пачек, забитие инструмента; 8 – спускоподъемная операция, установка цементного моста № 3, ожидание затвердевания цемента; 9 – спускоподъемная операция, установки цементных мостов № 4–8, ожидание затвердевания цемента, прокачки кольматационных пачек, бурение; 10 – спускоподъемная операция, бурение; 11 – спускоподъемная операция, установка цементного моста № 9, ожидание затвердевания цемента; 12 – спускоподъемная операция, бурение; 13 – спускоподъемная операция, установка цементного моста № 10, ожидание затвердевания цемента; 14 – дальнейшее бурение скважины

Fig. 1. Schedule of well 1 drilling with the main construction stages and performed operations:

- 1 – drilling, ОК-324 mm run-in-hole operation, ОК-324 mm cementing; 2 – drilling; 3 – ОК-245 mm run-in-hole operation, ОК-245 mm cementing, wait on cement; 4 – drilling; 5 – drilling tool round trip operation, placing of cement plug no. 1, wait on cement; 6 – round trip operation, drilling; 7 – round trip operation, placing of cement plug no. 2, wait on cement, formation damage pumping, drilling tool sticking; 8 – drilling tool round trip operation, placing of cement plug no. 3, wait on cement; 9 – round trip operation, placing of cement plug no. 4–8, wait on cement, formation damage pumping, drilling; 10 – round trip operation, drilling; 11 – round trip operation, placing of cement plug no. 9, wait on cement; 12 – round trip operation, drilling; 13 – round trip operation, placing of cement plug no. 10, wait on cement; 14 – further well drilling

циркуляции не наблюдалось, спускались бурильные трубы для установки кольматационных пачек, но при прокачке произошло зибитие трубного пространства коматантом. По окончании устранения

кольматационной пробки производился спуск на установку цементного моста № 3 с ожиданием затвердевания цемента, выход циркуляции при этом был полный (инт. 7 на рис. 1). Далее собиралась

роторная компоновка низа бурильной колонны, при разбурке цементного моста № 3 на глубине 1266 м открывается полное поглощение бурового раствора, спускается бурильная труба для установки цементного моста № 4 (инт. 8 на рис. 1). Операция по установке цементных мостов продолжалась до полной кольматации поглощающих интервалов.

Всего в интервале трапповой интрузии на этой скважине было установлено 10 цементных мостов, общее время их установки составило 10 ч, чистого времени на ожидание затвердевания цемента без проведения других операций потрачено 50 ч, на одно забитие кольматантом при прокачке кольматационных пачек, на разбуривание цементных мостов – суммарно 20 ч. Было потрачено материалов: около 400 м³ бурового раствора, 550 м³ технической воды, 50 м³ кольматационных пачек разного наполнения и концентрации, 70 м³ цемента для установки цементных мостов. Итого скважина была пробурена до глубины 1400 м почти за 28 дней.

Одним из перспективных направлений изоляции зон поглощений считается использование полимерных материалов на основе полиуретанов [7]. В зависимости от состава и состояния они могут быть как жидкими, так и твердыми. Характеристики, необходимые для ликвидации зон поглощений, имеются у гидроактивного пенополиуретана (таблица) [8], способного при контакте с водой переходить в твердое состояние и при этом увеличиваться в объеме. Композиции для производства пенополиуретанов содержат полиэфирный компо-

нент, олигоэфиракрилат и полиизоцианатный компонент [9]. В данное время пенополиуретановые составы активно применяются в строительных технологиях. Пенополиуретаны способны остановить безнапорный и напорный водоприток через швы и трещины строительных конструкций [10].

Основными достоинствами пенополиуретана перед другими композиционными материалами являются низкая вязкость, обеспечивающая хорошую проникающую способность в трещины и поры различных размеров, способность полимера увеличиваться в объеме до 12 раз в зависимости от состава и количества воды, а также его инертность к нефтепродуктам. Отмечается хорошая адгезия с различными материалами, такими как металл обсадной колонны и горные породы. При контакте с влажным песком пенополиуретан образует искусственный камень, а также он не имеет усадки при затвердевании, обладает закрытой пористой системой, что не позволяет свободной воде проникать сквозь его структуру. Гидроактивный пенополиуретан бывает двух видов: однокомпонентный и двухкомпонентный.

При ликвидации поглощений авторы предлагают использовать однокомпонентный пенополиуретан, так как двухкомпонентный имеет ряд недостатков. Один из основных – это необходимость смешения двух компонентов: смолы и отвердителя. Однокомпонентный гидроактивный пенополиуретан при контакте с водой расширяется и затвердевает. Его сроки полимеризации можно регулировать в зависимости от его

Характеристики гидроактивного пенополиуретана Characteristics of hydroactive polyurethane foam

Наименование показателя	Значение
Динамическая вязкость при 25 °С, мПа/с, не более	900
Начало активации полимера, с	30–50
Увеличение объема полимера во времени, с	80–120
Коэффициент расширения	от 6 до 12

состава. Для доставки пенополиуретана в зону поглощения разработан закрытый, собираемый на поверхности цилиндрический контейнер с поршнем (рис. 2).

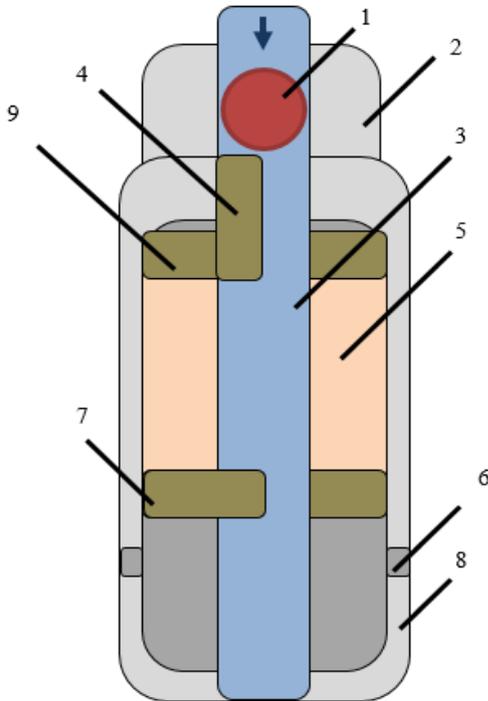


Рис. 2. Схема устройства механизма для ликвидации поглощений с использованием полиуретана:

1 – шар; 2 – буровые трубы; 3 – трубное пространство; 4 – посадочное седло; 5 – полиуретан; 6 – циркуляционные отверстия; 7 – шайба; 8 – корпус; 9 – поршень

Fig. 2. Structure diagram of the mechanism for drilling solution absorption elimination using polyurethane:

1 – ball; 2 – drilling stems; 3 – tubing volume; 4 – seat pocket; 5 – polyurethane; 6 – circulating openings; 7 – grummet; 8 – pod; 9 – piston

Заправка пенополиуретана в контейнер осуществляется на поверхности. В зависимости от интенсивности поглощения выбирается количество гидроактивного пенополиуретана, необходимого для изоляции всего интервала поглощения с учетом растекания тампонажной смеси. Полимеризованный пенополиуретан увеличится в объеме минимум в 6 раз, значит, интенсивность поглощения делится на 6 и получается объем

неактивированного полимера, который нужен для изоляции поглощения. После подготовки происходит соединение погружного контейнера с нижней частью колонны буровых труб 2, которые будут спускать в скважину. Использование контейнера позволяет производить доставку гидроактивного пенополиуретана непосредственно в зону поглощения, что исключает полимеризацию в трубном пространстве. После спуска бурового инструмента происходит активация механизма контейнера посредством сброса шара 1 внутрь колонны буровых труб, шар садится на посадочное седло 4. Подается буровой раствор, что повышает давление в трубном пространстве 3. Активируется поршень 9 цилиндрического контейнера, и полиуретан 5 выдавливается через подпружиненные устройства 6 в затрубное пространство. Во то время, как шар только сел в седло и происходит рост давления, необходимо производить расхождение колонны буровых труб во избежание прихвата. При нахождении в нижнем положении поршня механизм открывает каналы трубного пространства и дает возможность осуществлять замкнутый циркуляционный цикл.

Для сравнения был построен график бурения скважины с применением гидроактивного пенополиуретана и контейнера (рис. 3). При бурении под эксплуатационную колонну ОК-178 мм на глубине 1217 м отмечено поглощение бурового раствора интенсивностью 24 м³/ч с последующей потерей циркуляции. Скважина переводится на техническую воду. Производится подъем компоновки низа буровой колонны и спуск буровых труб с контейнером. Скидывается шар, и происходит выдавливание в затрубное пространство пенополиуретана (инт. 5 на рис. 3) с последующей полимеризацией. Поднимается инструмент, и спускается роторная компоновка низа буровой колонны на бурение

(инт. 6 на рис. 3). При последующих поглощениях после выдавливания пенополиуретана для лучшей изоляции поглощающего горизонта происходит установка цементного моста № 1 (инт. 7 на рис. 3) и цементного моста № 2 (инт. 9 на рис. 3). Дальнейшее углубление продолжается в штатном режиме (инт. 10 на рис. 3).

Время бурения скважины 1 уменьшилось бы до 18 дней, так как сократилось время установки 8 цементных мостов, их ожидания затвердевания цемента, разбухания цементного камня, дополнительных спускоподъемных операций. Расход цемента уменьшился до 15 м³, бурового раствора и технической воды – в два-три раза.

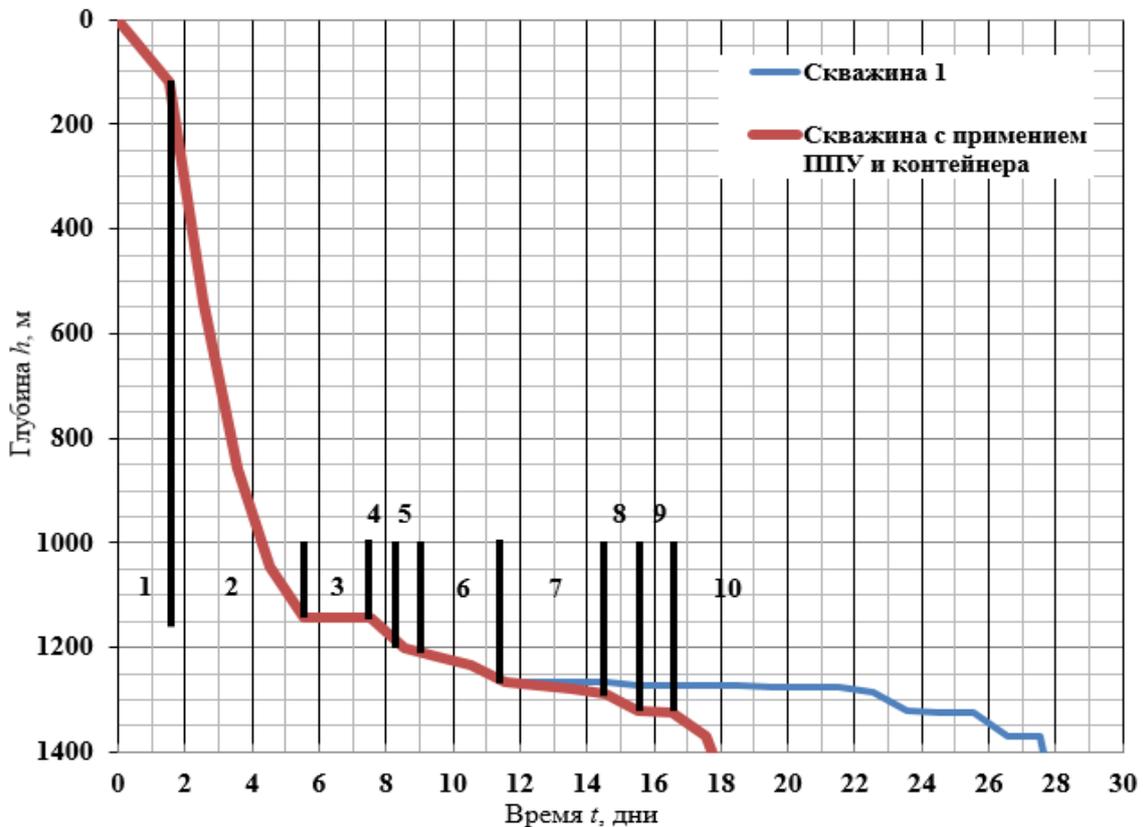


Рис. 3. График бурения скважины с применением пенополиуретана и контейнера с основными этапами строительства и проводимыми операциями:

1 – бурение, спуск ОК-324 мм, цементирование ОК-324 мм; 2 – бурение; 3 – спуск ОК-245 мм, цементирование ОК-245 мм, ожидание затвердевания цемента; 4 – бурение; 5 – спускоподъемная операция, спуск контейнера, активация пенополиуретана; 6 – спускоподъемная операция, бурение; 7 – спускоподъемная операция, спуск контейнера, активация пенополиуретана, установка цементного моста № 1, ожидание затвердевания цемента, бурение; 8 – бурение; 9 – спускоподъемная операция, спуск контейнера, активация пенополиуретана, установка цементного моста № 2, ожидание затвердевания цемента; 10 – спускоподъемная операция, дальнейшее бурение скважины

Fig. 3. Schedule of well drilling with the use of polyurethane foam and a container with the main construction stages and conducted operations:

1 – drilling, ОК-324 mm run-in-hole operation, ОК-324 mm cementing; 2 – drilling; 3 – ОК-245 mm run-in-hole operation, ОК-245 mm cementing, wait on cement; 4 – drilling; 5 – drilling tool round trip operation, pod immersion, polyerethane foam activation; 6 – round trip operation, drilling; 7 – round trip operation, pod immersion, polyerethane foam activation, placing of cement plug no. 1, wait on cement, drilling; 8 – drilling; 9 – round trip operation, pod immersion, polyerethane foam activation, placing of cement plug no. 2, wait on cement; 10 – round trip operation, further drilling of a well

Сделав только одну операцию по установке первого цементного моста и его ожидание затвердевания цемента, можно сократить затраченное время до 18 дней и не выполнять последующие спускоподъемные операции по установке повторных цементных мостов в одном интервале и времени их ожидания затвердевания цемента, необходимого для набора прочности цемента.

Результаты

Разработанный метод борьбы с поглощениями позволяет закачивать гидроактивный пенополиуретан в водонасыщенную зону поглощения, где с минимальными сроками полимеризации он будет реагировать с пластовыми водами, тем самым изолируя пласт от скважины и сокращая время до проведения одной спускоподъемной операции. Если даже пенополиуретан не полностью заполнит поровое пространство, то механизм восстановления циркуляции дает возможность сразу установить цементный мост без проведения дополнительной спускоподъемной операции. Вероятность установки первого цементного моста без повторных установок в этом интервале будет выше, так как пенополиуретан активируется в затрубном пространстве и не дает цементу проникать глубже в пласт, что сократит время строительства скважины и расход материалов на ликвидацию осложнений,

связанных с поглощениями бурового раствора.

Выводы

Все большее количество работ посвящено применению синтетических смол для ликвидации аварий в скважинах. Это объясняется не только их эффективностью, но и увеличивающейся с каждым годом доступностью и сравнительно невысокой стоимостью. С работами по ликвидации поглощений бурового раствора связаны материальные потери и не поддающиеся учету значительные убытки в добыче нефти, происходящие из-за ухудшения коллекторских свойств продуктивности пластов, невысокого качества цементирования эксплуатационных колонн на осложненных скважинах и несвоевременного ввода скважин в эксплуатацию. Из вышесказанного следует, что использование гидроактивного пенополиуретана в спускаемом цилиндрическом контейнере перспективно для ликвидации зон поглощений на месторождениях Восточной Сибири, так как позволяет доставить полимер непосредственно в зону осложненного интервала для эффективной изоляции поглощающего горизонта. Также сокращается время на строительство скважины за счет экономии сроков ликвидации осложненных интервалов, в том числе в трапповых интрузиях, посредством уменьшения количества устанавливаемых цементных мостов.

Библиографический список

1. Шишин К.А., Черныш В.Ф. Временная инструкция по ликвидации поглощений при бурении скважин в процессе бурения. Иркутск: Изд-во Вост-СибНИИГГиМС, 1983. 68 с.

2. Рогачев М.К., Стрижнев К.В. Борьба с осложнениями при добыче нефти. М.: Недра, 2006. 295 с.

3. Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R. Composition and Properties of Drilling

and Completion Fluids. Elsevier: Gulf Professional Publishing, 2011. 748 p.

4. Ларина Т.А. Рыхлова С.И., Чушкина Н.И. Справочник базовых цен на буровые работы при инженерно-геологических изысканиях для строительства. М.: Изд-во ПНИИИС, 2000. 144 с.

5. Gray K.E., Yongcun F. Review on fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening // Journal of Petro-

Ieum Science and Engineering. 2017. Vol. 152. P. 511–522.

6. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Заканчивание скважин. М.: Недра, 2002. 667 с.

7. Семенов Н.Я. Исследование и изоляция поглощающих и водопроявляющих пластов: пособие для инженера-технолога по бурению скважин. В 2 ч. Ч. 1. Уфа: Изд-во БашНИПнефть, 2010. 375 с. Ч. 2. Уфа: Изд-во БашНИПнефть, 2014. 525 с.

8. ООО «НеваАкваСтоп»: гидроизоляционные материалы, ремонтные составы и материалы специального назначения // ООО «НеваАкваСтоп» [Электронный ресурс]. URL: <http://nevaaquastop.ru> (10.09.2018).

9. Кабанов В.А. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия, 1977. 1152 с.

10. Rzezniczak A.-K. Durability of repair techniques of fine cracks in concrete. Hamilton: McMaster University, 2010. 127 p.

References

1. Shishin K.A., Chernysh V.F. *Vremennaya instruktsiya po likvidatsii pogloshchenii pri burenii skvazhin v protsesse bureniya* [Interim instruction for absorption elimination while well drilling]. Irkutsk: East-Siberian research institute of geology, geophysics and mineral raw materials Publ., 1983, 68 p. (In Russian).

2. Rogachev M.K., Strizhnev K.V. *Bor'ba s oslozhnennyami pri dobyche nefti* [Complication control in oil production]. Moscow: Nedra Publ., 2006, 295 p. (In Russian).

3. Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R. *Composition and Properties of Drilling Muds and Completion Fluids*. Elsevier: Gulf Professional Publishing, 2011, 748 p.

4. Larina T.A., Rykhlova S.I., Chushkina N.I. *Spravochnik bazovykh tsen na burovye raboty pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh dlya stroitel'stva* [Reference book of base prices for drilling operations at engineering-geological surveys for construction]. Moscow: Production and Research Institute for Engineering Research in Construction Publ., 2000, 144 p. (In Russian).

5. Gray K.E., Yongcun F. Review on fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 152, pp. 511–522.

6. Basarygin Yu.M., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. *Zakanchivanie skvazhin* [Well completion]. Moscow: Nedra Publ., 2002, 667 p. (In Russian).

7. Semenov N.Ya. *Issledovanie i izol'yatsiya pogloshchayushchikh i vodo-proyavlyayushchikh plastov: posobie dlya inzhenera-tekhnologa po bureniyu skvazhin* [Study and isolation of absorbing and water-producing formations: learning aids for an engineer-technologist on well drilling]. In 2 parts. Part 1. Ufa: BashNIPoil' Publ., 2010, 375 p. Part 2. Ufa: BashNIPoil' Publ., 2014, 525 p. (In Russian).

8. ООО «НеваАкваСтоп»: гидроизоляционные материалы, ремонтные составы и материалы специального назначения [NevaAkvaStop LLC: waterproofing materials, repair compounds and special purpose materials]. ООО «НеваАкваСтоп» [NevaAkvaStop LLC]. Available at: <http://nevaaquastop.ru> (10 September 2018).

9. Kabanov V.A. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1977, 1152 p. (In Russian).

10. Rzezniczak A.K. Durability of repair techniques of fine cracks in concrete. Hamilton: McMaster University, 2010, 127 p.

Критерии авторства

Мартынов Н.Н, Заливин В.Г. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Martynov N.N., Zalivin V.G. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.291+551.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-118-124>

К ТЕКТОНИКЕ И МЕТАЛЛОГЕНИИ ШАРЫЖАЛГАЙСКОГО ВЫСТУПА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

© Ж.В. Семинский^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: Целью работы является рассмотрение тектонических и металлогенических особенностей Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы с использованием метода тектоно-металлогенического анализа. В пределах Шарыжалгайского выступа, разделенного на четыре крупных блока – террейна, широко распространены линейные и кольцевые тектонические сооружения различной иерархии: зоны глубоководных долговживущих разломов, гранито-гнейсовые валы и купола, имеющие метаморфическую или магматическую природу. Металлогеническое районирование определяется типами разноранговых тектонических элементов и выражается в сочетании линейных (металлогенические, рудные зоны) и нелинейных площадных – кольцевых, эллипсовидных (рудные районы, узлы, поля) – единиц. На примере Окинского мега-свода показано проявление различных тектонических элементов рудоконтроля. Для эндогенной золоторудной, редкометалльной и редкоземельной минерализации продуктивным был поздне- и постколлизийный этап орогенеза, что связано с развитием Центрально-Азиатского суперплюма. В глубинном строении земной коры структура инверсионного мафитового слоя, включающего поднятия и прогибы, коррелируется с тектоническими элементами, выделяемыми на поверхности, и свидетельствует о наличии участков повышенной эндогенной активности тектоносферы, а следовательно, перераспределения и концентрации металлогенных элементов.

Ключевые слова: платформа, разломные зоны, своды, купола, металлогенические зоны, рудные узлы, закономерности рудолокализации

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 17-45-388083 «Мантийные источники гранитоидных магм, их роль в металлогении золота и тяжелых металлов (на примере пород ТТГ ассоциаций южных районов Иркутской области)».

Информация о статье: Дата поступления 16 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 18 декабря 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Семинский Ж.В. К тектонике и металлогении Шарыжалгайского выступа Сибирской платформы (Восточный Саян). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):118–124. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-118-124.

TO TECTONICS AND METALLOGENY OF SHARYZHALGAY UPLIFT OF SIBERIAN PLATFORM (EAST SAYAN)

© Zh.V. Seminsky^a

^aIrkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^aСеминский Жан Вячеславович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования, тел.: 8 (3952) 405112, e-mail: seminsky@istu.edu

Zhan V. Seminsky, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation systems of the Institute of Subsoil Use, tel.: 8 (3952) 405112, e-mail: seminsky@ex.istu.edu

ABSTRACT: The purpose of the work is to consider the tectonic and metallogenic features of the Sharyzhalgay uplift of the Siberian platform foundation using the method of the tectonic-metallogenic analysis. The area of the Sharyzhalgay uplift divided into four major blocks – terranes – is characterized by widely distributed linear and circular tectonic structures of different hierarchy. These are the zones of preexistent deep faults, granite and gneiss arches and domes that have metamorphic or igneous nature. Metallogenic zoning is determined by the types of different-rank tectonic elements and is expressed in the combination of linear (metallogenic, ore zones) and nonlinear areal units – ring, ellipsoidal (ore regions, clusters, fields). Manifestation of different tectonic elements of ore control is shown on example of the Okinsky mega anticlinal fold. Late and post-collision stage of orogenesis was productive for endogenous gold, rare-metal and rare-earth mineralization. It is associated with the development of the Central Asian superplume. In the deep structure of the earth's crust the structure of the inversion mafic layer including uplifts and deflections corresponds to the tectonic elements outcropping on the surface and indicates the presence of the areas of increased endogenous activity of the tectonosphere, i.e. suggests the redistribution and concentration of metallogenic elements.

Keywords: platform, fault zones, anticlinal folds, domes, metallogenic zones, ore clusters, regularities of ore localization

Acknowledgements: The work is performed with the funding from Russian Foundation for Basic Research, the project 17-45-388083 *Mantle sources of granitoid magmas and their role in the metallogeny of gold and heavy metals (on example of rocks of the tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) Association of the southern districts of the Irkutsk region).*

Information about the article: Received November 16, 2018; accepted for publication December 18, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Seminsky Zh.V. To tectonics and metallogeny of Sharyzhalgay uplift of Siberian Platform (East Sayan). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):118–124 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-118-124.

Как известно, весьма благоприятные обстановки для рудообразования и условия локализации эндогенных месторождений полезных ископаемых создаются часто в древних консолидированных (жестких) блоках земной коры. Такими блоками являются метаморфические террейны (срединные массивы) складчатых областей и щиты платформ. В восточных районах страны это Муйская глыба, Урулюнгуйский блок в пределах Центрально-Азиатской складчатой области, Буреинский массив и др. В составе Сибирской платформы к ним относятся Алданский, Шарыжалгайский краевые щиты, Анабарский щит и прилегающие антеклизы. В их пределах проявлены весьма разнообразные металлогенические факторы и предпосылки формирования эндогенного и метаморфогенного оруденения. Это прежде всего высокая

проницаемость тектоносферы для флюидов и магматических масс, создаваемая зонами внутренних и краевых разломов, колонны глубинных и периферических магматических очагов, связанных с плюмами, разнообразный по составу (в складчатых областях) или однообразный, но мощный по появлению (на платформах) магматизм, развитие процессов разновозрастного метаморфизма различных фаций и другие проявления эндогенной активности. Многоэтапностью этих процессов обусловлено проявление разновозрастных металлогенических эпох – от палепротерозойской до мезозойской включительно. Ведущими полезными ископаемыми являются благородные, редкоземельные, редкие, черные металлы, полиметаллы, горнотехническое сырье.

Такими особенностями тектоники и металлогении обладает Шарыжалгайский выступ фундамента Сибирской платформы, который протягивается от Байкала в северо-западном направлении на 300 км при ширине от 10 до 80 км. С юго-запада выступ ограничен Главным Саянским разломом, с северо-востока – разломами Присаянской зоны, по которым осадочные толщи платформенного чехла фрагментарно надвинуты на метаморфические породы выступа.

Комплексы пород, слагающие выступ, и его строение описывались неоднократно многими исследователями, в том числе В.П. Сухоруковым, В.И. Левицким, О.М. Розеном, Л.Н. Урманцевой, А.Д. Ножкиным, О.М. Туркиной и др. [1–6]. Установлено, что внутреннее строение этого выступа определяется в первую очередь разделением его на четыре блока-террейна. По данным ряда исследователей [1, 2] это Иркутный, Китойский, Онотский, Булунский блоки, которые сменяют друг друга от Байкала в северо-западном направлении. Границы этих блоков проходят по зонам глубинных разломов субмеридионального или северо-западного простирания. Булунский и Онотский террейны являются гранит-зеленокаменными, Китойский и Иркутный – гранулит-гнейсовыми [1, 3]. Булунский блок (междуречье рек Онот и Ока) сложен биотит-амфиболовыми, биотитовыми гнейсами, гранито-гнейсами, гранат-кордиритовыми гнейсами, сланцами, амфиболитами, кварцитами, кварцито-гнейсами. Для Онотского блока характерны мигматизированные гнейсы, гранито-гнейсы, кристаллосланцы, амфиболиты. Китойский и Иркутный блоки сложены амфибол-пироксеновыми сланцами, биотит-гранатовыми гнейсами, присутствуют лейкократовые гранат- и гиперстеновые гнейсы. В гранат-зеленокаменных террейнах наблюдаются пакеты пластин, осложненные надвигами [2], которые формировались на коллизионном и внут-

риплитном (активизационном) этапах развития.

Внутреннее строение выступа рассматривается как комплекс зеленокаменных поясов и гранулит-гнейсовых толщ, а именно сочетание гранито-гнейсовых, эндербитовых куполов и сложнодислоцированных сравнительно узких зон метавулканитов и метаосадков [1, 6]. Характерны крутые или пологие куполовидные, открытые складки субмеридионального и северо-западного простирания, которые осложнены мелкой напряженной складчатостью.

Купола имеют сложное внутреннее строение: мощности слоев уменьшаются в центре, по периферии наблюдается линейная ориентировка, связанная, вероятно, с движениями с северо-запада на юго-восток в период и после формирования куполов. Развиваются мелкие изоклинные складки течения. Весьма примечательно, что на заключительных этапах происходили переориентировка купольных структур и интенсивные тектонические движения, на что указывают многочисленные зеркала скольжения с субгоризонтальными бороздами. Тектонические движения «стягиваются» в межблоковые зоны разломов. Эти наложенные процессы перестройки, очевидно, позднепалеозойские-раннемезозойские, наиболее проявлены в северо-западной части Шарыжалгайского выступа и на юге. Они имеют коллизионную природу, а также особенно активно проявились в стадию внутриплитного орогенеза.

Металлогения Шарыжалгайского выступа, изучавшаяся многими исследователями (П.А. Рощектаев, Г.Я. Абрамович, А.Д. Ножкин, О.М. Глазунов, В.Е. Загорский, В.И. Левицкий, А.С. Мехоношин, Т.Б. Колотилина, В.М. Макагон и др.), характеризуется разнообразием месторождений и рудопроявлений полезных ископаемых, которые формировались в различные металлогенические эпохи, определяющиеся этапностью развития этого

сложного геотектонического элемента земной коры. Главными из полезных ископаемых являются золото, редкоземельная, редкометалльная минерализация, железо, медь, титан, литий, алюминий, а также бериллий, марганец, уран, тальк, магнезит, ртуть, нефрит, лазурит и др. Разнообразны и генетические процессы рудообразования: метаморфогенные, эндогенные гидротермальные, карбонатитовые, пегматитовые, экзогенные. На большое разнообразие тектонических обстановок и генетических типов рудных проявлений указывает ряд примеров. В архейских и протерозойских метаморфических толщах локализуются магнетитовые рудные залежи. Жильные месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации, медные и молибденовые рудные тела формировались в зонах разломов. Эти месторождения, а также редкоземельные и редкометалльные пегматиты связаны с магматическими комплексами палеозойского возраста. Марганцевые и железные руды типа кор выветривания и инфильтрационные (Шунгулежское в Присаянье и др.), а также урановые месторождения (Столбовое, Гарет) тяготеют к зонам несогласия и локализуются в разрывных структурах. Группа сульфидных медно-никелевых месторождений (Кингашское на северо-западе и др.) связана с поясом интрузивных массивов северо-западного простирания.

В северо-западной половине Шарыжалгайского выступа распространены месторождения тантала, ниобия, урана, титана. Апатит-редкометалльные месторождения (Белозиминское) карбонатитового типа локализуются в массивах ультраосновных щелочных пород, которые также преобладают в северо-западной части выступа (Булунский блок). Юго-восточнее распространены месторождения золота, железа, бокситов, слюд, талька, асбеста, нефрита и др. Таков неполный перечень полезных ископаемых рассматриваемой площади.

Металлогеническое районирование определяется элементами сложного тектонического строения Шарыжалгайского выступа, а именно сочетанием рассмотренных выше линейных (разломных) и нелинейных кольцевых (сводов различных порядков и конфигурации) структур.

Металлогенические подразделения линейного типа контролируются разрывными нарушениями, входящими в систему Главного Саянского и Присаянского разломов. Простирание таких металлогенических зон изменяется от северо-западного до близмеридионального. Внутри этих металлогенических зон месторождения локализуются на пересечениях продольных разломов с поперечными (Мало-Тагульский, Белозиминский, Байкальский и другие рудные узлы) [7]. Сложными тектоническими условиями характеризуется локализация рудных объектов в сводовых структурах. Среди последних выделяются упомянутые выше своды гранито-гнейсовой природы, а также своды, связанные с развитием магматических комплексов.

Сочетание линейных и нелинейных рудоконтролирующих тектонических элементов различных порядков можно показать на примере изучавшегося нами Окинского рудного района, расположенного в юго-западной части Онотского блока [8]. Здесь гидротермальные преимущественно золоторудные месторождения и рудопроявления локализуются в пределах различных тектонических элементов крупного Окинского мегасвода.

Окинский мегасвод формировался на коллизионном и постколлизионном этапах в связи с плюмтектоническими процессами. Он интенсивно деструктурирован, разбит на отдельные поднятые и опущенные блоки. Ядро свода, разделенное на две части близширотным разломом, сложено венд-кембрийскими и девонскими гранитоидами. Окружающая свод и хорошо выраженная в его южной части промежуточная (переходная) зона

включает известково-карбонатно-терригенные толщи. Краевая (периферическая) зона представляет собой коллаж поднятых и опущенных блоков, в том числе Гарганского и Шутхулайского, и имеет наиболее сложное строение. Активные коллизионные и внутриплитные активизационные процессы привели к формированию круто- и пологозалегающих разломов, в том числе надвигов, по которым происходило перемещение («сползание») отдельных пластин. Развивались локальные гранито-гнейсовые купола.

Большинство гидротермальных месторождений и рудопроявлений золота локализуется в наиболее гетерогенной и сложной по строению периферической зоне мегасвода, которая может рассматриваться как металлогеническая зона. При этом в ее пределах оруденение приурочено к разломам, пересекающим или обрамляющим блоки архейско-протерозойских пород (Холбинская, Шутхулайская, Гарганская зоны разломов). Протяженная Холбинская (20 км) зона разломов, включающая Зун-Холбинское и Барун-Холбинское месторождения, отделяет Гарганский архейский блок от крупного интрузивного массива.

Примером условий локализации золотого оруденения в более локальных гранито-гнейсовых куполах являются месторождения золота Ульзытинское, Динамитное, которые залегают в зонах разломов по периферии свода, где нами были откартированы ореолы повышенной раздробленности пород [9].

Весьма показательно, что ряд рассмотренных рудо локализирующих тектонических элементов находит отражение в глубинном строении земной коры. Были использованы материалы гравиметровых, магнитных съемок, данные глубинного сейсмического зондирования и др. [10]. Так, структура инверсионного мафитового слоя земной коры, включающая поднятия и прогибы, коррелируется

с тектоническими элементами, выделяемыми на поверхности, и свидетельствует о наличии участков повышенной эндогенной активности тектоносферы, а значит, и перераспределения металлогенных элементов. При этом месторождения и рудопроявления тяготеют к поднятиям мафитового слоя к поверхности.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Закономерности локализации эндогенных месторождений полезных ископаемых Шарыжалгайского выступа определяются тектоническими элементами, которые развиваются в его пределах в процессе коллизии слагающих его тектонических блоков и на этапе внутриплитного тектогенеза. Это создает сложную систему линейных (разломных) и нелинейных (близких к кольцевым) тектонических элементов различных порядков. Среди последних различаются крупные и локальные сводовые поднятия, связанные с магматизмом (в том числе рудоносные магматические тела основного и ультраосновного-щелочного состава), а также гранито-гнейсовые своды и купола метаморфической или смешанной природы. Тектонические элементы, проявленные на поверхности, находят отражение в глубинном строении земной коры, реконструированном на основе анализа серии карт физических полей.

2. В пределах Шарыжалгайского выступа проявилось несколько металлогенических циклов плитотектонического и плюмтектонического этапов. Весьма продуктивным, особенно для эндогенной золоторудной, редкометалльной и редкоземельной минерализации, были поздние и постколлизионные этапы орогенеза. В частности, развитие золоторудных систем происходило на древнем консолидированном фундаменте этой глыбы, испытывавшей влияние процессов коллизии в допалеозойское и среднепалеозойское время, а затем подвергшейся воздей-

ствию постколлизиионных тектономагматических процессов (Ж.В. Семинский, А.Т. Корольков, С.П. Летунов и др., 2006). При этом формировались глубокопроникающие магмо- и рудопроводящие разрывные структуры, дренировавшие очаги известково-щелочных магм.

3. Металлогеническое районирование определяется типами разноранговых тектонических элементов и выражается в сочетании линейных (металлогенические, рудные зоны) и нелинейных площадных – кольцевых, эллипсовидных (рудные узлы, поля) – единиц.

Библиографический список

1. Сухоруков В.П. Декомпенсационные минеральные микроструктуры в гранулитах Иркутского блока (Шарыжалгайский выступ Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 9. С. 1314–1335.

2. Туркина О.М., Ножкин А.Д. Океанические и рифтогенные метавулканические ассоциации зеленокаменных поясов северо-западной части Шарыжалгайского выступа, Прибайкалье // Петрология. 2008. Т. 16. № 5. С. 501–526.

3. Rosen O.M., Condie K.C., Natarov L.M., Nozhkin A.D. Archean and early Proterozoic evolution of the Siberian craton: a preliminary assessment // Archean Crustal Evolution. Amsterdam: Elsevier, 1994. P. 411–459.

4. Урманцева Л.Н., Туркина О.М., Капитонов И.Н. Состав и происхождение протолитов палеопротерозойских кальцифиров Иркутского блока (Шарыжалгайский выступ Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 1681–1697.

5. Левицкий В.И., Левицкий И.В. Минерагеническая типизация Присяянского краевого выступа фундамента Сибирской платформы // Минерагения докембрия: материалы Всерос. конф. Петрозаводск, 2010. С. 158–162.

6. Ножкин А.Д. Докембрий юго-западной окраины Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 1. С. 5–16.

7. Рудные узлы России / под ред. Е.В. Плющева. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2001. 416 с.

8. Семинский Ж.В., Летунов С.П. Тектонические особенности южной части Окинского мегасвода в связи с проблемой золотоносности Юго-Восточного Саяна // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2004. № 2 (18). С. 46–56.

9. Семинский Ж.В., Корольков А.Т., Бузов С.А. Рудоконтролирующие структуры золоторудных узлов в гнейсовых и гранито-гнейсовых комплексах (Восточная Сибирь) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 2 (45). С. 19–34.

10. Семинский Ж.В. Эндогенно-рудные системы Юго-Восточной Сибири в инверсионном слое земной коры // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 2 (51). С. 5–18.

References

1. Sukhorukov V.P. Decompression mineral microtextures in granulites of the Irkut block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian Platform). *Geologiya i geofizika* [Russian

Geology and Geophysics], 2013, vol. 54, no. 9, pp. 1314–1335. (In Russian).

2. Turkina O.M., Nozhkin A.D. Oceanic and riftogenic metavolcanic associa-

tions of greenstone belts in the northwestern part of the Sharyzhalgai Uplift, Baikal region. *Petrologiya* [Petrology], 2008, vol. 16, no. 5, pp. 501–526. (In Russian).

3. Rosen O.M., Condie K.C., Natapov L.M., Nozhkin A.D. Archean and early Proterozoic evolution of the Siberian craton: a preliminary assessment. *Archean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 1994, pp. 411–459.

4. Urmantseva L.N., Turkina O.M., Kapitonov I.N. Protoliths of Paleoproterozoic calciphyres from the Irkut block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian craton): Composition and origin. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2012, vol. 53, no. 12, pp. 1681–1697. (In Russian).

5. Levitskii V.I., Levitskii I.V. *Mineragenicheskaya tipizatsiya Prisyanskogo kraevogo vystupa fundamenta Sibirskoi platformy* [Mineragenic typification of Prisyansk marginal uplift of the Siberian platform foundation]. *Materialy Vseros. konf. "Minerageniya dokembriya"* [Proceedings of All-Russian Conference "Metallogeny of the Precambrian"]. Petrozavodsk, 2010, pp. 158–162. (In Russian).

6. Nozhkin A.D. Precambrian of the southwest margin of Siberian platform. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2009, vol. 314, no. 1, pp. 5–16. (In Russian).

7. Plyushchev E.V. *Rudnye uzly Rossii* [Ore clusters of Russia]. Saint-Petersburg: A.P. Karpinsky Russian Geological

Research Institute Publ., 2001, 416 p. (In Russian).

8. Seminskii Zh.V., Letunov S.P. Tectonic features of the southern part of the Oka mega anticline in connection with the problem of gold mineralization of the South of the Eastern Sayan. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2004, no. 2 (18), pp. 46–56. (In Russian).

9. Seminskii Zh.V., Korol'kov A.T., Buzov S.A. Ore-controlling structures of gold ore clusters in gneissic and granite gneiss complexes (Eastern Siberia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 2 (45), pp. 19–34. (In Russian).

10. Seminskii Zh.V. Endogenous ore systems of South-Eastern Siberia in the earth crust inversion layer. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2015, no. 2 (51), pp. 5–18. (In Russian).

Критерии авторства

Семинский Ж.В. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Seminsky Zh.V. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Уважаемые коллеги!

1. В журнале публикуются статьи по следующей тематике:
 - геологическое строение рудных, нерудных, в том числе горючих, месторождений полезных ископаемых (вмещающие комплексы пород, связь оруденения с магматизмом, метаморфизмом, осадконакоплением);
 - тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
 - минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
 - генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых;
 - минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
 - методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
 - экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
 - физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
 - геофизические, геохимические и другие методы поисков месторождений полезных ископаемых;
 - геоинформационные технологии в науках о Земле;
 - технология и техника горно-буровых работ;
 - технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
 - технология обогащения и переработки минерального сырья;
 - геммология;
 - гидрогеология и инженерная геология;
 - безопасность жизнедеятельности;
 - геоэкология.
2. Статьи принимаются от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.
3. Объем статьи должен быть не более 15 с. машинописного текста, включая библиографический список, таблицы и иллюстрации.
4. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows на CD-диске или по электронной почте geo_info@istu.edu. В обязательном порядке в ауд. Ж-04 предоставляется два экземпляра в распечатанном виде на листах формата А4. Электронный и печатный варианты должны быть полностью идентичны. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 14 (строки через 1,0 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху, снизу, слева и справа – 2,5 см, абзацный отступ – 1 см, ориентация страницы – книжная.
5. В структуру статьи должны входить: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, введение (краткое), цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства (вся информация предоставляется одним файлом).
6. Аннотация по объему должна быть 200–250 слов и композиционно содержать следующие разделы с их наименованиями: цель, методы, результаты, выводы.
7. Статья должна сопровождаться актом экспертизы, сведениями обо всех авторах (название вуза, организации, учреждения, должность и структурное подразделение, наличие ученой степени, ученого звания, контактные рабочие (для публикации) и сотовый

(по возможности для связи) телефоны, почтовый и электронный адреса) на русском и английском языках. Образец оформления первого разворота статьи приводится ниже.

8. Текст статьи формируется в одну строку. Рисунки и таблицы помещаются в тексте непосредственно после абзаца с первой ссылкой на них.

9. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул, например MathType или Microsoft Equation Editor. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

10. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали. Дополнительно должны приводиться переводы названий таблиц на английский язык.

11. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 5 рисунков). Они должны быть выполнены чисто и аккуратно в соответствии с требованиями к геологической графике, в оттенках черно-серого цвета. Масштаб их должен быть пригодным для тиражирования, а размер – не более 160×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок должен иметь подпись (под рисунком), в которой дается объяснение всех его элементов. В электронном варианте статьи рисунки дополнительно предоставляются в виде отдельных файлов с расширением *JPEG. Для построения графиков и диаграмм следует использовать программу Microsoft Office Excel. Дополнительно должны приводиться переводы названий рисунков на английский язык.

12. Ссылки на литературные источники приводятся в тексте в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере обращения к источникам литературы. Минимальное количество источников в библиографическом списке – не менее 12. При этом самоцитирование автора не должно превышать 30 % от общего количества источников, не допускаются ссылки на диссертации и авторефераты. Желательно ссылаться на оригинальные источники (первоисточники), на статьи и монографии по данной тематике, на публикации из высокорейтинговых источников. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science – не менее 3 источников); кроме того, рекомендуем ознакомиться с трудами ученых ИРНТУ по тематике работы, это можно сделать на сайте журнала или в системе РИНЦ, осуществив поиск по ключевым словам. Также в списке литературы должно быть не менее 30 % ссылок на иностранные источники.

13. Список литературы составляется в двух вариантах*.

Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008.

Второй вариант (References) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Он оформляется в том же порядке, что и библиографический список. На сайте translit.net можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста на латиницу. В вариантах транслитерации необходимо предварительно выбрать вариант BSI.

*В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов, не сокращая их на трех, четырех. Правильное описание используемых источников является залогом того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее авторов (и, соответственно, организации, региона, страны). По цитированию журнала определяется его научный уровень, авторитетность, эффективность деятельности его редакционного совета и т. д.

Для русскоязычных статей из журналов, сборников, материалов конференций следует использовать следующий вариант структуры библиографической ссылки: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык, название источника (транслитерация и перевод на английский язык в квадратных скобках), выходные данные с обозначениями на английском языке (в получившемся описании заменяются обязательные элементы – «том» на «vol.», «№» на «no.», «с.» на «pp.» для диапазона страниц). Перевод названия статьи на английский язык обязательно должен соответствовать опубликованному переводу в цитируемом журнале, если таковой имеется. Если есть, обязательно указывается DOI.

В иных источниках (книги, монографии) также в дополнение к транслитерации приводится перевод названия источника на английский язык, место издания обязательно должно быть переведено, а название издательства остается транслитерированным и обозначается добавлением слова Publ.

Описание статей, материалов конференций и книг на русском языке заканчивается описанием языка источника (для русского – In Russian).

Описание нормативных документов необходимо приводить в транслитерации и в переводе на английский язык в квадратных скобках.

Ссылки на источники на иностранном языке приводятся без изменения.

Примеры оформления источников в References можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

14. Статья должна быть подписана всеми авторами (количество авторов должно быть не более пяти). Подписи авторов заверяются в канцелярии учреждения или вуза. Статьи аспирантов и магистрантов должны быть подписаны научным руководителем.

15. Желательно, чтобы к статье были приложены выписка из протокола заседания кафедры (лаборатории) о рекомендации публикации статьи и рецензия одного из членов редколлегии журнала.

16. Авторы статей, публикуемых в сборнике, обязуются содействовать его популяризации в своих организациях и содействовать подписке.

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

19. Представленные статьи проходят проверку на антиплагиат.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной, включая один авторский экземпляр. Стоимость каждого дополнительного экземпляра журнала – 300 рублей.

Статьи, опубликованные в журнале «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых», реферируются и рецензируются.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, аудитория Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: 8 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: 8 (3952) 405101, e-mail: sk@istu.edu

Статьи необходимо направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: 8 (3952) 405069, e-mail: geo_info@istu.edu, аудитория Ж-04.

Образец оформления статьи

УДК 549.09

**МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ РУД
ТОМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

© Е.М. Курчевская^а, М.В. Яхно^б, А.Е. Сенченко^с

^аСНИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а.

^бИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: *Цель.* Цель данной статьи заключается в исследовании технологических типов руд Томинского месторождения меди, изучении минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. *Методы.* Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитово-формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. *Результаты.* В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щепнистые и щепнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щепнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щепнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. *Выводы.* Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Для цитирования: Курчевская Е.М., Яхно М.В., Сенченко А.Е. Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал). Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018;41(4):9–25. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-9-25.

^аКурчевская Елена Михайловна, старший научный сотрудник, e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru
Elena M. Kurchevskaya, Senior Researcher, e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

^бЯхно Марина Владиславовна, старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых, e-mail: ymar@istu.edu
Marina V. Yakhno, Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals, e-mail: ymar@istu.edu

^сСенченко Аркадий Евгеньевич, генеральный директор, e-mail: senchenko@tomsgroup.ru
Arkady E. Senchenko, CEO, e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL TYPES OF TOMINSKOYE DEPOSIT COPPER ORES (SOUTHERN URAL)

© Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"),
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federatoin

^bIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federatoin

ABSTRACT. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Main conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

For citation: Kurchevskaya E.M., Yakhno M.V., Senchenko A.Y. Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2018;41(4):9–25 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-9-25.

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы (заключение)), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorship criteria) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научный журнал

№ 4 (65) 2018

Редактор Ф.А. Посысоева
Компьютерная верстка В.А. Храмовских
Перевод на английский язык В.В. Батицкой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 28.12.2018 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 17.
Тираж 500 экз. Зак. 283. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83