

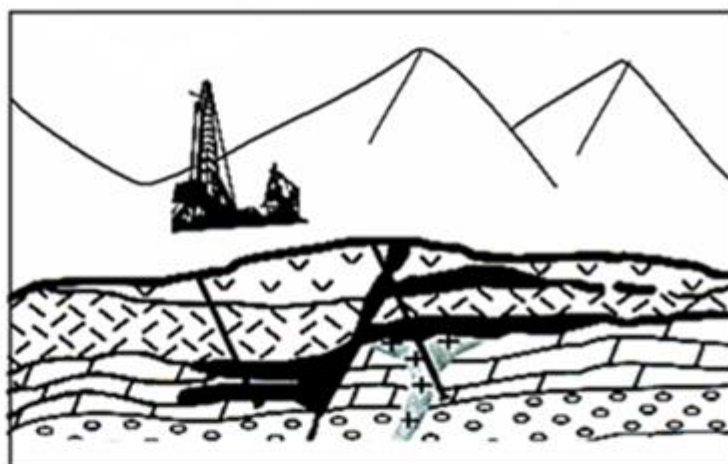
ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463



ИЗВЕСТИЯ

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ



2018

Том 41, № 1

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, № 1

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. 1

**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. – № 1. – 159 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».

В разделе журнала «Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» значительное место уделено статьям, содержащим описание минерально-сырьевой базы крупных рудных районов и месторождений Забайкалья, Азербайджана, проблеме нефтегазоносности платформенных структур Сибирской и Китайской платформ, а также минералогии и тектонике рудных районов.

Раздел «Технологии разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» содержит статьи по эффективности извлечения золота, технологии бурения скважин в шельфовой зоне, интерпретации геофизических данных, а также по проблеме геоэкологии.

Статьи предназначены для научных сотрудников НИИ, преподавателей вузов, специалистов геологической отрасли и горного дела, а также могут быть полезны аспирантам, магистрантам и студентам.

Редакционная коллегия:

Главный редактор – Ж.В. Семинский, д-р г.-м. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет, действительный член РАЕН (г. Иркутск, Россия)

Заместитель главного редактора, ответственный редактор выпуска – В.И. Снетков, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Члены редколлегии:

Д.П. Гладкочуб, член-корр. РАН, д-р г.-м. наук, 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 г.-м. наук, проф., Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия), А.В. Козлов, д-р г.-м. наук, проф., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (г. Санкт-Петербург, Россия), А.Т. Корольков, д-р г.-м. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия), В.А. Макаров, д-р г.-м. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия), Ю.Б. Миронов, д-р г.-м. наук, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, Россия), Очир Гэрэл, д-р г.-м. 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 г.-м. наук, проф., Забайкальский государственный университет (г. Чита, Россия)

Ответственный секретарь – В.А. Храмовских, к-т техн. наук, доцент, 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: 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. 1. – 159 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 the press books 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 no. 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".

The section of the journal *Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits* contains the articles that describe the mineral resource base of the major ore areas and deposits of Transbaikalia, Azerbaijan and consider the problem of the oil and gas content of the platform structures of Siberian and Chinese platforms as well as the mineralogy and tectonics of ore regions.

The section *Technologies of Exploration and Development of Mineral Deposits* presents the articles discussing the efficiency of gold extraction, the technology of drilling wells in the shelf zone, geophysical data interpretation as well as the problem of geocology.

The articles are intended for research institute associates, university lecturers, specialists in the geological industry and mining, they also can be useful to graduate students, undergraduates and students.

Editorial Board:

Editor-in-Chief – Zh.V. Seminsky, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University, Full Member of the Russian Academy of Natural Sciences (Irkutsk, Russia)

Deputy Editor-in-Chief, Executive Editor – V.I. Snetkov, Doctor of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Members of the editorial board:

V.A. Dushin, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Ural State Mining University (Ekaterinburg, Russia), D.P. Gladkochub, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical 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), A.T. Korolkov Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), A.V. Kozlov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, National Mineral Resources University "Mining University" (St. Petersburg, Russia), V.A. Makarov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia), Yu.B. Mironov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (St. Petersburg, Russia), Ochir Gerel, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Mongolian university of science and technology (Ulan Bator, Mongolia), B.L. Talgamer, Doctor of Technical Sciences, Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), A.I. Trubachev, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Trans-Baikal State University (Chita, Russia)

Executive secretary – V.A. Khramovskikh, Candidate of technical sciences, Associate Professor of 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. ΦC77-67479 from 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, № 1 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

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

Гордиенко И.В., Ланцева В.С., Бадмацыренова Р.А., Елбаев А.Л. Селенгинский рудный район Республики Бурятия: геологическое строение, минерализация, геодинамика, перспективы развития.....	9
Мансуров М.И., Сафари М.Г., Каландаров Б.Г., Керимов В.М., Мамедова А.Г. Зональность оруденения и метасоматитов в медно-порфировых месторождениях Гошгарчайской рудно-магматической системы (Малый Кавказ, Азербайджан)	38
Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Егорова Н.Е. Корреляция разрезов докембрийских отложений Сибирской и Китайской платформ в связи с перспективой нефтегазоносности.....	54
Боролдоева В.В., Медведев А.Я. Минералогия щелочных пикробазальтов хребта Хэнтей (Южное Забайкалье).....	66
Черемных А.С., Каримова А.А. Особенности проявления разноранговых зон растяжения в рельефе экспериментальных моделей и их природных аналогов.....	79
Яковлева А.А., Мальцева Г.Д. Кристаллохимические аспекты оценки энергии взаимодействия частиц глинистых минералов.....	99

Технологии разведки и разработки месторождений полезных ископаемых

Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Применение регрессионного и дисперсионного анализов для интерпретации гравиметрических данных.....	115
Мязин В.П., Литвинцев С.А. Повышение эффективности гравитационного извлечения золота из комплексных золотополиметаллических руд.....	126
Зайцев В.И. Определение давления гидроразрыва пласта при бурении скважин на шельфе.....	137
Богданов А.В., Дударев В.И., Качор О.Л., Чайка Н.В., Панина М.А. Оценка эффективности действия гуминоминерального комплекса при ремедиации сельскохозяйственных и селитебных земель, загрязненных мышьяком и тяжелыми металлами.....	144
К сведению авторов.....	153

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. 1 2018

CONTENTS

Pp.

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

Gordienko I.V., Lantseva V.S., Badmatsyrenova R.A., Elbaev A.L. The Selenga ore district of the Buryat republic: geological structure, minerageny, geodynamics, development prospects.....	9
Mansurov M.I., Safari M.H., Kalandarov B.G., Kerimov V.M., Mamedova A.G. Mineralization and metasomatites zoning in porphyry copper deposits of Goshgar-chai ore magmatic system (Lesser Caucasus, Azerbaijan).....	38
Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Egorova N.E. Correlation of the Precambrian sections of the Siberian and Chinese platform deposits by oil and gas content prospects.....	54
Boroldoeva V.V., Medvedev A.Ya. Mineralogy of Khentei ridge alkaline picrobasalts (Southern Transbaikalia).....	66
Cheremnykh A.S., Karimova A.A. Manifestation features of different rank extension zones in the relief of experimental models and their natural analogues.....	79
Yakovleva A.A., Maltseva G.D. Crystallochemical aspects in the evaluation of clay mineral particle interaction energy.....	99

Technologies of Exploration and Development of Mineral Deposits

Kanaikin V.S., Turutanov E.H., Buyantogtokh B. Application of regression and variance analyses for gravimetry data interpretation.....	115
Myazin V.P., Litvintsev S.A. Improving efficiency of gold recovery from complex gold-polymetallic ores by gravity separation.....	126
Zaitsev V.I. Formation fracture pressure determination when drilling offshore holes.....	137
Bogdanov A.V., Dudarev V.I., Kachor O.L., Chaika N.V., Panina M.A. Evaluation of humic mineral complex efficiency at remediation of arsenic and heavy metals contaminated agricultural and residential lands.....	144
Attention of authors	153

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.2+552.33+553.04

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-9-37>

СЕЛЕНГИНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ: ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, МИНЕРАГЕНИЯ, ГЕОДИНАМИКА, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© И.В. Гордиенко^а, В.С. Ланцева^б, Р.А. Бадмацыренова^с, А.Л. Елбаев^д

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

РЕЗЮМЕ. Цель. Исследования направлены на изучение геологического строения, минерагенического районирования, характеристику рудных узлов, генетических типов рудных месторождений, геодинамических условий их формирования, прогнозов и перспектив дальнейшего промышленного освоения Селенгинского рудного района Республики Бурятия. **Методы.** Использованы комплексные структурно-геологические и минерагенические исследования с учетом ранее проведенных тематических, поисково-съёмочных, геолого-разведочных работ. Для анализа вещественного состава магматических пород и руд широко применялись современные петролого-геохимические и изотопно-геохронологические методы с использованием в качестве элементов индикаторов состава редких и редкоземельных элементов, микрозондовые определения минералов, а также изотопные (U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Sr-Sr, Ar-Ar, O, C и др.) и литолого-биостратиграфические данные. **Результаты.** Установлено, что в пределах рудного района широко развиты верхнепалеозойские и раннемезозойские тектоно-магматические структуры. Они связаны с развитием трансрегионального верхнепалеозойского Селенгино-Витимского вулканоплутонического пояса рифтогенного типа, а также с формированием мезозойской Западно-Забайкальской области рифтогенного (внутриплитного) магматизма. С магматической деятельностью позднепалеозойско-мезозойского этапа связаны основные промышленно значимые ресурсы минерального сырья Селенгинского рудного района, которые сосредоточены в рудных узлах (Куналейский, Кижингинский, Черемшано-Ошурковский, Таширский и др.), а также за их пределами. Установлено, что основными рудными полезными ископаемыми в пределах района являются молибден и бериллий, определяющие минерагенический облик исследованного рудного района. **Выводы.** Получены новые вещественные характеристики верхнепалеозойских и мезозойских внутриплитных магматических комплексов и связанных с ними месторождений минерального сырья (Mo, Be, Ti, кварцевое, флюоритовое и апатитовое сырьё), а также других перспективных рудных объектов медного, золотого, уранового и редкоземельно-барий-стронциевого оруденения. Выявлены геодинамические условия их формирования и главные возрастные рубежи проявления рудообразующих процессов, оценены перспективность добычи полезных ископаемых в Селенгинском рудном районе и вовлечения этого рудного потенциала в программу модернизации экономики региона.

Ключевые слова: геологическое строение, рудный район, стратегическое сырьё, месторождения, минерагеническое районирование, перспективы освоения.

^аГордиенко Иван Власович, член-корреспондент РАН, советник РАН, главный научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433891, e-mail: gord@pres.bscnet.ru

Ivan V. Gordienko, Corresponding Member of RAS, Counsellor of RAS, Chief Researcher, tel.: 8 (3012) 433891, e-mail: gord@pres.bscnet.ru

^бЛанцева Валентина Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 434035, e-mail: valery_fox@list.ru

Valentina S. Lantseva, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Junior Researcher, tel.: 8 (3012) 434035, e-mail: valery_fox@list.ru

^сБадмацыренова Роза Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 434035, e-mail: brose@ginst.ru

Roza A. Badmatsyrenova, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher, tel.: 8 (3012) 434035, e-mail: rose@ginst.ru

^дЕлбаев Алексей Леонидович, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 434035, e-mail: elbaev@ginst.ru

Aleksey L. Elbaev, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Junior Researcher, tel.: 8 (3012) 434035, e-mail: elbaev@ginst.ru

Информация о статье. Дата поступления 4 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 7 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Гордиенко И.В., Ланцева В.С., Бадмацыренова Р.А., Елбаев А.Л. Селенгинский рудный район Республики Бурятия: геологическое строение, минерогения, геодинамика, перспективы развития // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 9–37. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-9-37

THE SELENGA ORE DISTRICT OF THE BURYAT REPUBLIC: GEOLOGICAL STRUCTURE, MINERAGENCY, GEODYNAMICS, DEVELOPMENT PROSPECTS

© I.V. Gordienko, V.S. Lantseva, R.A. Badmatsyrenova, A.L. Elbaev

Geological Institute SB RAS,
6a, Sakhyanova St., Ulan-Ude, 670047, Buryat Republic, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The studies are aimed at the investigation of geological structure and mineragenetic zonation, description of ore clusters, genetic types of ore deposits and geodynamic conditions of their formation, prediction and prospects of future commercial exploration of the Selenga ore district of the Buryat Republic. **Methods.** The study employs complex structural-geological and mineragenetic researches including thematic, explorative-surveying and geological-prospecting works carried out earlier. The analysis of the material composition of magmatic rocks and strategic raw material ores is performed by means of modern petrological-geochemical and isotope-geochronological methods using the composition of rare and rare-earth elements, microprobe minerals identification as well as isotope (U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Sr-Sr, Ar-Ar, O, C etc.) and lithological-biostratigraphic data. **Results.** It is found that Upper Paleozoic and Early Mesozoic tectono-magmatic structures are widely developed within the ore district. They are associated with the development of the transregional Upper Paleozoic Selenga-Vitim volcano-plutonic belt of riftogenic type as well as with the formation of the West Transbaikalian Mesozoic zone of riftogeneous (intraplate) magmatism. The main commercially important strategic mineral raw material resources of the Selenga ore district which are located in the ore clusters (the Kunaley, Kizhinga, Cheremshanka-Oshurkovo, Tashir et al.) and beyond their bounds are associated with the Late Paleozoic-Mesozoic magmatic activity. It is found that molybdenum and beryllium are the main ore minerals within the district which determine the mineragenetic features of the investigated ore district. **Conclusions.** The new material characteristics of the Upper Paleozoic and Mesozoic intraplate magmatic complexes, the associated deposits of strategic mineral raw material (Mo, Be, Ti, quartz, fluorite and apatite raw material) and other promising ore objects of copper, gold, uranium and rare-earth-barium-strontium mineralization are obtained. The geodynamic conditions of their formation and the main age boundaries of the ore-forming processes are revealed. The mining prospects of the Selenga ore district and the involvement of this ore potential in the program of the region's economic modernization are estimated. **Keywords:** geological structure, ore district, strategic raw material, deposits, mineragenetic zoning, development prospects

Article info. Received 4 December 2017; accepted for publication 7 March 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Gordienko I.V., Lantseva V.S., Badmatsyrenova R.A., Elbaev A.L. The Selenga ore district of the Buryat republic: geological structure, minerageny, geodynamics, development prospects. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii 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. 9–37. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-9-37

Введение

Исследования направлены на изучение геологического строения, минерогенического районирования, характеристики рудных узлов, генетических типов рудных месторождений, геодинамиче-

ских условий их формирования, прогнозов и перспектив дальнейшего промышленного освоения Селенгинского рудного района Республики Бурятия. Рудный район в административном плане расположен в центральной густонаселенной и

экономически развитой части Республики Бурятия. Он занимает южную и восточную части Прибайкалья и юго-западную часть Западного Забайкалья, общая площадь – 48000 км². Тектоническое строение района определяется его расположением в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы, в пределах Саяно-Байкальского орогенного пояса.

Геологическое строение Селенгинского рудного района

Строение этой территории обусловлено развитием байкальских, каледонских, герцинских и мезозойских (киммерийских) структурно-формационных комплексов. Современные границы этих комплексов контролируются крупными разрывными нарушениями северо-восточного и субмеридионального простираний, имеющими в основном сдвиговую природу (рис. 1).

Байкальские (неопротерозойские) структуры вскрываются в основном по побережью озера Байкал в хребтах Хамар-Дабан и Морской, а также на юге в Кяхтинском и Заганском выступах метаморфических ядер. Они сложены осадочно-метаморфическими толщами хангарульской, селенгинской и кяхтинской серий, прорванных отдельными телами синклизонных гранитоидов (заганский комплекс), возрастное положение которых в настоящее время точно не определено и колеблется от раннего протерозоя до девона включительно [2].

Каледонские (венд-раннепалеозойские) структуры в пределах Селенгинского рудного района представляют фрагменты краевых осадочных бассейнов (темникская, астайская, куналейская свиты) Удино-Витимской и Джидинской островодужных систем, которые на территории рудного района имеют трансформное сочленение друг с другом по серии субмеридиональных сдвигов, фиксируемых западнее Гусиноозерской впадины. Геология и металлогения назван-

ных островодужных систем рассмотрена авторами данной статьи ранее [2–5].

Наибольшее распространение в пределах Селенгинского рудного района имеют верхнепалеозойские (герцинские) и мезозойские (киммерийские) тектономагматические структуры. Они связаны с развитием трансрегионального верхнепалеозойского (C₂-P₁) Селенгино-Витимского (Монголо-Забайкальского) вулканоплутонического пояса рифтогенного типа, а также с формированием мезозойской (T₂₋₃-K₁) Западно-Забайкальской области рифтогенного (внутриплитного) магматизма [6–10].

Первые импульсы верхнепалеозойского магматизма на изученной территории были связаны с заложением Селенгино-Витимского вулканоплутонического пояса и представлены мощным трахиандезит-базальт-риолитовым вулканизмом и туфогенно-терригенным осадконакоплением в рифтогенных структурах (гунзанская, унгуркуйская, сурхэбтинская свиты – C₂-P₁), а также внедрением интрузий известково-щелочных коровых гранитоидов баргузинского комплекса (330–290 млн лет), а затем после небольшого перерыва – субщелочных и нормальной щелочности гранитоидов зазинского и бичурского комплексов с возрастом от 305 до 285 млн лет. Именно с этим этапом было связано массовое формирование гранитоидов Ангаро-Витимского ареал-плутона (батолита). При этом гранитоиды баргузинского комплекса ранней стадии формирования (325–290 млн лет) Ангаро-Витимского батолита проявились на огромной площади (около 150000 км²) Западного Забайкалья и являлись «сшивающими» для раннекаледонских комплексов Удино-Витимской островодужной системы. Влияние гранитоидов батолита, особенно зазинского комплекса, распространялось от верховий реки Витим до бассейна реки Селенги и далее на территорию Джидинского рудного района [5, 11].

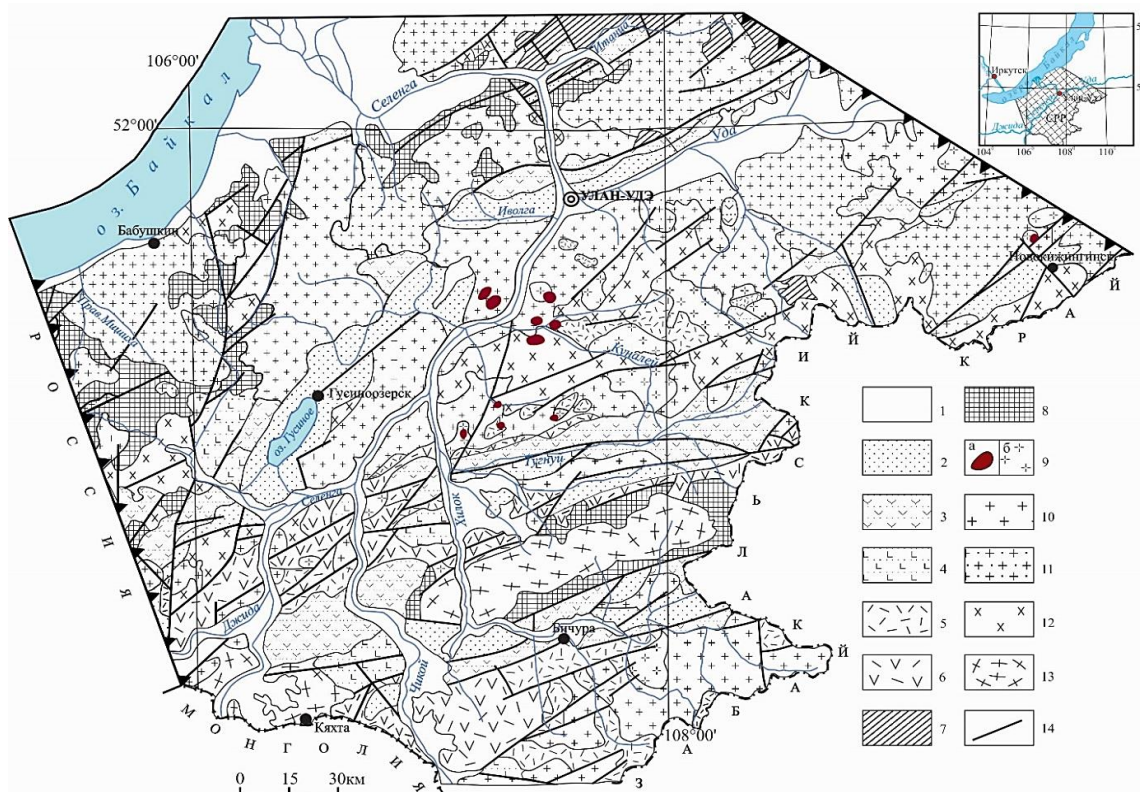


Рис. 1. Схема геологического строения Селенгинского рудного района
(составлена с использованием «Геологической карты Юга Восточной Сибири и Северной части МНР» масштаба 1:1500000 [1] и «Государственной геологической карты Российской Федерации» масштаба 1:1000000 [2] с дополнением авторов)

Стратифицированные осадочные отложения и вулканогенные образования:

- 1 – неоген-четвертичные терригенные и вулканогенные образования – Ng-Q;
 - 2 – раннемеловые осадочные и вулканогенные образования, карбонаты в рифтогенных впадинах (гусиноозерская серия, хилокская свита, халютинский комплекс) – K₁;
 - 3 – юрские осадочные отложения и вулканогенные образования в рифтогенных впадинах (тугнуйская, ичетуйская, байкальская свиты) – J;
 - 4 – средне-позднетриасовые осадочные и вулканогенные образования (черноярская, цаган-хунтейская свиты) – T₂₋₃;
 - 5 – позднепермские вулканогенные образования (алентуйская, тамирская свиты) – P₂;
 - 6 – позднекаменноугольно-раннепермские вулканогенные и осадочно-вулканогенные образования (гунзанская, ункуркуйская свиты) – C₃-P₁;
 - 7 – девон-каменноугольные терригенно-карбонатные отложения (татауровская, удунгинская свиты) – D-C;
 - 8 – неопротерозой-кембрийские осадочно-метаморфические толщи (темникская, астайская свиты) – NP-Є
- Интрузивные комплексы:
- 9 – средне-верхнетриасовый позднекуналейский и соготинский комплексы лейкократовых гранитов, гранит- и сиенит-порфиров, эксплозивных брекчий – γ-γп-εпT₂₋₃ (а); позднепермский-нижнетриасовый куналейский комплекс субщелочных и щелочных гранитов и сиенитов – γ-εP₂-T₁ (б);
 - 10 – ранне-позднепермский бичурский и зазинский комплексы гранитов, лейкогранитов и кварцевых сиенитов с базитами – γ-εγP₁₋₂;
 - 11 – средне-позднекаменноугольный баргузинский комплекс авто- и аллохтонных гранитов γ C₂₋₃;
 - 12 – раннепалеозойский джидинский комплекс аккреционно-коллизийных гранитоидов – γνPZ₁;
 - 13 – протерозойский гранитно-метаморфический комплекс (заганский комплекс) – μPR;
 - 14 – разрывные нарушения: сбросы, сдвиги, надвиги

На врезке показано положение Селенгинского рудного района (СРР)

(based on "Geological map of the South of Eastern Siberia and the Northern part of the Mongolian People's Republic", scale 1:1500 000 [1] and "State geological map of the Russian Federation", scale 1:1000 000 [2] with the authors' addition)

1 – Neogene-Quaternary terrigenous and volcanogenic formations – Ng-Q;

- 2 – Early Cretaceous sedimentary and volcanogenic formations, carbonates in the riftogenic depressions (the Gusinozersk series, Khilok suite, Khalyuta complex) – K_1 ;
- 3 – Jurassic sedimentary deposits and volcanogenic formations in the riftogenic depressions (the Tugnuy, Ichetuy, Baikal suites) – J;
- 4 – Middle-Late Triassic sedimentary and volcanogenic formations (the Chernoyarovo, Tsagan-Khunthey suites) – T_{2-3} ;
- 5 – Late Permian volcanogenic formations (the Alentuy, Tamir suites) – P_2 ;
- 6 – Late Carboniferous-Early Permian volcanogenic and sedimentary-volcanogenic formations (the Gunzan, Ungurkuy suites) – C_3 - P_1 ;
- 7 – Devonian-Carboniferous terrigenous-carbonate deposits (the Tataurovo, Udunga suites) – D-C;
- 8 – Neoproterozoic-Cambrian sedimentary-metamorphic strata (the Temnik, Astay suites) – NP-Є

9 – the Middle-Upper Triassic Late Kunaley and Sogota complexes of leucocratic granites, granite- and syenite-porphyrries, explosive breccias – γ - γ P- ϵ T₂₋₃ (a); the Late Permian-Lower Triassic Kunaley complex of subalkaline and alkaline granites and syenites – γ - ϵ P_{2-T1} (b);

- 10 – the Early-Late Permian Bichura and Zaza complexes of granites, leucogranites and quartz syenites with basites – $\gamma\text{-}\epsilon\text{P}_{1-2}$;
11 – the Middle-Late Carboniferous Barguzin complex of auto- and allochthonous granites γC_{2-3} ;
12 – the Early Paleozoic Dzhida complex of accretion-collision granitoids – γvPZ_1 ;
13 – Proterozoic granite-metamorphic complex (the Zagan complex) – μPR ;
14 – disjunctive dislocations: faults, shifts, thrusts

The Selenaga ore district (SOD) location is shown in the insert

толщ, сложенных преимущественно бимодальными трахибазальт-трахириолитовыми сериями пород и комагматичными им щелочными гранитоидами [5, 8, 9].

Начиная с позднего триаса, юры, раннего мела, вся территория рудного района была связана с развитием Западно-Забайкальской области рифтогенного (внутриплитного) магматизма. Эти процессы привели к образованию многочисленных впадин и горстообразных поднятий с мощными трахибазальтовыми излияниями, формированием стратовулканов и бимодальных трахибазальт-трахириолит-комендитовых вулканических серий в ассоциации с разнообразными базитами и гранитоидами. Многие исследователи, изучавшие позднекарбон-пермотриасовый щелочно-гранитный магматизм Западного Забайкалья, указывают на необычную длительность (около 120 млн лет) этих магматических процессов в пределах относительно небольшого региона [12–15].

В это время в пределах Селенгинского рудного района возникли крупные вулканоплутонические структуры площадью до 2000 км², в строении которых различаются поля вулканитов щелочно-бимодальных ассоциаций (цаганхунтэйская, чернорювская свиты) и массивы щелочных гранитов и сиенитов позднекуналейского и соготинского комплексов с возрастом 230–210 млн лет (Хамбинский, Цаган-Дабанский хребты, Тугнуйская впадина и др.) [16]. Широкое распространение плутонических и вулканических пород средне-позднетриасового этапа в виде протяженной полосы, большие мощности вулканических толщ, сложенных трахибазальтами, трахитами, трахириолитами, комендитами, наличие рифтогенных грабенов, базальт-комендитовых дайковых поясов большой протяженности с участием щелочных гранитоидов свидетельствуют о связи этого внутриплитного магматизма с плюмовыми источниками [5, 10, 13, 17, 18].

В позднем мезозое в связи с внедрением позднеюрских субщелочных гнейсо-гранитов (Мангиртуйский и другие массивы) и образованием Тугнуйской и Чикой-Хилокской рифтогенных впадин возник гравитационный коллапс с эксгумацией протерозойской утолщенной коры и формированием гранитно-метаморфических ядер кордильерского типа в пределах Заганского хребта и Кяхтинского поднятия [19]. Кроме того, в это же время в пределах Западно-Забайкальской области в разломных структурах пулл-апарт, ограничивающих позднеюрско-раннемеловые впадины, образовались вулканические и субвулканические щелочные и субщелочные магматические породы и связанные с ними залежи карбонатитов, возраст которых – 115–130 млн лет [20, 21].

Считается, что именно с магматической деятельностью позднепалеозойско-раннемезозойского этапа связаны основные промышленно значимые ресурсы

стратегического минерального сырья Селенгинского рудного района.

Структурно-минерагеническое районирование

Селенгинский рудный район впервые был выделен при металлогеническом районировании Западно-Забайкальской редкометалльной провинции в пределах Витимо-Джидинского рудного пояса [22]. В дальнейшем он вошел в состав Селенгино-Витимской структурно-минерагенической зоны [23], которая связана с развитием трансрегионального верхнепалеозойского Монголо-Забайкальского вулканоплутонического пояса рифтогенного типа [7, 24]. Селенгино-Витимская зона на северо-западе граничит с Прибайкальской, а на юго-востоке – с Чикой-Ингодинской структурно-минерагеническими зонами. Профилирующее оруденение Селенгино-Витимской зоны – молибденовое, бериллиевое и флюоритовое – содержится в Куналейском, Кижингинском, Новопавловском и Таширском рудных узлах. Сходные процессы рудообразования происходили в Тамирском рудном узле Чикой-Ингодинской зоны. В Прибайкальской зоне сосредоточены в основном месторождения нерудного сырья (кварциты, апатит, графит) и карбонатитов.

Выявлением и изучением месторождений и проявлений Селенгинского рудного района в течение длительного времени, начиная с 1960–1980-х и последующих годов, занимались многие коллективы геологов-съемщиков и разведчиков Бурятского геологического управления (Д.Д. Сагалуев, В.А. Новиков, О.В. Соколов, А.А. Карбаинов, А.К. Извеков, В.Е. Леонов, Л.И. Лешуков, В.С. Платов, В.В. Кошкин, В.В. Скрипкина, Е.Е. Батурина, В.Л. Верник, В.Ф. Барский, Ю.П. Гусев и др.), а также научно-исследовательских, а в последнее время и коммерческих организаций. В результате этих работ в пределах Селенгинского рудного района был выделен ряд рудных узлов с

различной минерализацией и ресурсным потенциалом. На площади рудного района выявлено 24 месторождения, около 70 проявлений и более 70 минерализованных точек. Как упоминалось, основными полезными ископаемыми в пределах района являются бериллий, молибден, титан, кварцевое, флюоритовое и апатитовое сырье (рис. 2). Менее распространено медное, золотое, урановое и редкоземельно-барий-стронциевое оруденение. Крупные рудные узлы – Куналейский, Кижингинский и Черемшано-Ошурковский), а перспективные недоразведанные рудопроявления сосредоточены в небольших рудных узлах Таширском, Новопавловском, Тамирском и др. и за их пределами.

Как указывалось выше, активные внутриплитные (рифтогенные) процессы, проявленные в позднем палеозое-мезозое, привели к формированию эндогенных месторождений редких металлов, титана, золота и редкоземельных элементов, а также нерудного сырья постмагматического и гидротермально-метасоматического генезиса. В настоящее время установлено, что в этих процессах главную роль играли мантийные плюмы и потоки глубинных трансмагматических растворов (флюидов), которые концентрировались в верхних горизонтах рудно-магматических систем, в зонах развития даек и разрывных нарушений. Действие плюмов, по-видимому, продолжалось длительное время, от позднего палеозоя до мезозоя включительно, и имело пульсирующий характер. Этим обусловлена разновозрастность магматизма и рудообразующих процессов практически на всех рудных объектах Селенгинского рудного района.

Генетические типы и геологическое строение месторождений полезных ископаемых

Поскольку молибденовое и бериллиевое оруденение определяют металлогенический облик исследованного

рудного района, далее мы остановимся более подробно на этих месторождениях и проявлениях минерального сырья. Остальные рудные объекты охарактеризованы более кратко. Крупные месторождения нерудного стратегического сырья (Черемшанское кварцитовое, Ошурковское апатитовое и многочисленные месторождения флюорита) в настоящее время хорошо изучены, и по ним существует большое количество доступных опубликованных материалов. Они в статье упоминаются кратко и заслуживают в дальнейшем отдельного всестороннего анализа.

Молибден. Месторождения и проявления молибдена относятся к плутоногенно-гидротермальному генетическому типу. Источниками молибденового оруденения являются высокощелочные вулканоплутонические ассоциации верхнего палеозоя – раннего мезозоя Селенгинского рудного района. При этом выделяются следующие формационные типы: 1) молибден-порфировый: Жарчихинское, Харитоновское, Колобковское, Леоновское, Надеинское, Новопавловское и ряд других; 2) молибден-кварцево-грейзеновый: Ивановское, Тамирское, Хамбинское, Шено-Байдал, Шалоты, Гуджертуйское и другие более мелкие проявления. Большинство молибденсодержащих объектов относится к молибден-порфировым и сосредоточено в Куналейском и Тамирском рудных узлах.

Жарчихинское месторождение молибдена было открыто в 1978 г. в процессе геологической съемки масштаба 1:50000. В 1979–1983 гг. здесь были последовательно проведены поисково-оценочные и разведочные работы, геологоструктурные, петролого-геохимические и геоэкологические исследования (В.Л. Верник и др., 1983; В.Л. Верник, Д.А. Танцырев, 1990; Ю.П. Гусев и др., 2008). Месторождение изучалось сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья

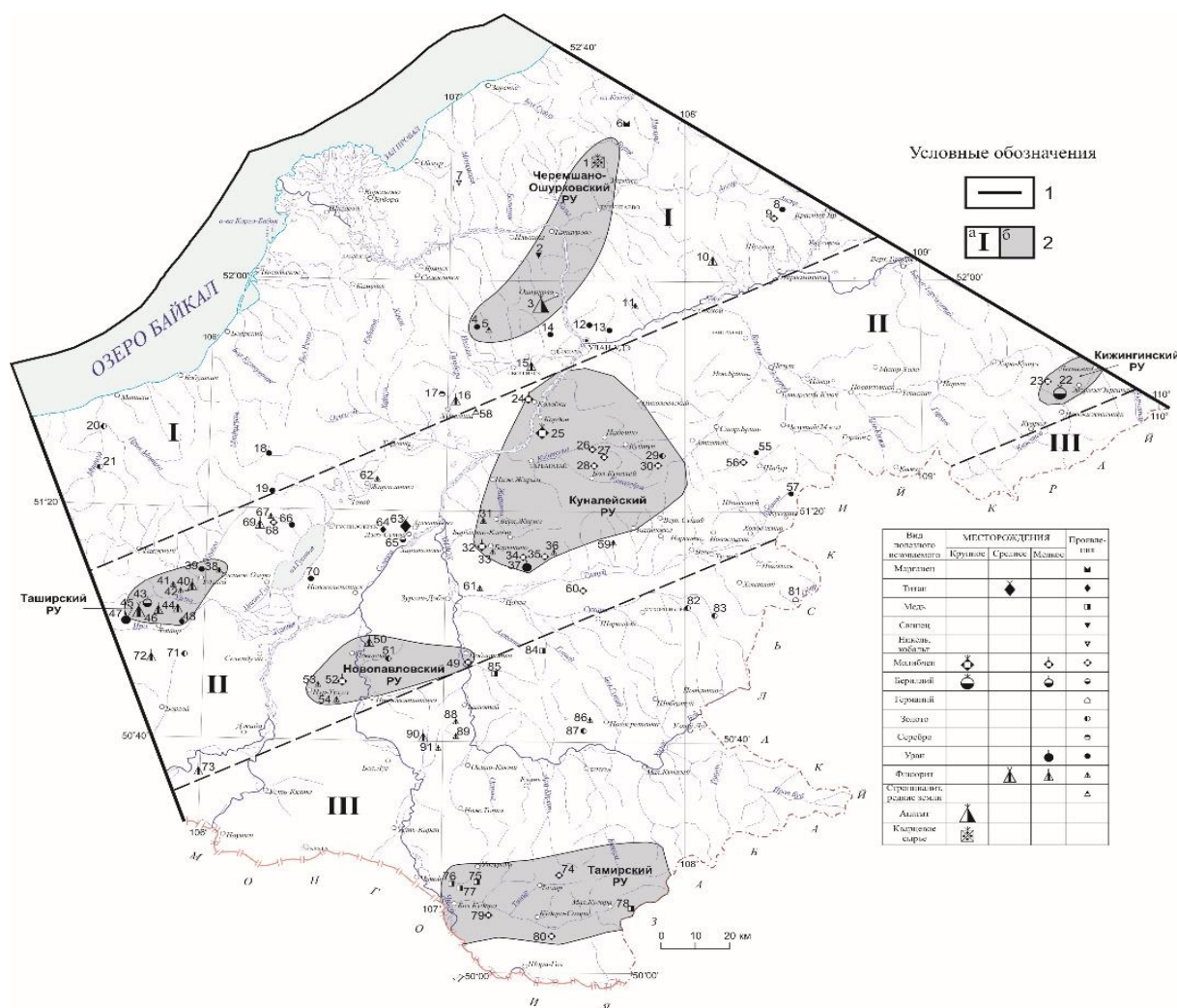


Рис. 2. Схема структурно-минералогического районирования и размещения рудных узлов, месторождений и проявлений в пределах Селенгинского рудного района

(составлена по результатам геолого-съёмочных работ Бурятского геологического управления с изменениями и дополнениями авторов)

- 1 – границы Селенгинского рудного района; 2 – структурно-минералогические зоны (а) и рудные узлы (б): I – Прибайкальская (Черемшано-Ошурковский), II – Селенгино-Витимская (Куналейский, Новопапловский, Кижингинский, Таширский), III – Чикой-Ингодинская (Тамирский)
- Месторождения и проявления: зона I: 1 – Черемшанское (кКв); 2 – Ловцовское (пPb); 3 – Ошурковское (кАр); 4 – Шалутай (пU); 5 – Халютинское (пSr+Ba); 6 – Усугайское (пMn); 7 – Метешихинское (пNi,Co); 8 – Ангырское (Горное) (пU); 9 – Шибирка (пMo); 10 – Первомайское (мFI); 11 – Эрхирикское (пFI); 12 – Березовское (пU); 13 – Удинское (пU); 14 – Гурульбинское (пU); 15 – Иволгинское (мFI); 16 – Третьяковское (мFI); 17 – Малый Мыкерт (Санжиевское) (пAg,Pb); 18 – Верхне-Убукурское (пU); 19 – Васильевское (пU); 20 – Осередыш (пAu); 21 – Изгиб (пAu); зона II: 22 – Ермаковское (кBe); 23 – Зун-Шибирское (пMo); 24 – Колобковское (мMo); 25 – Жарчихинское (кMo); 26 – Надеинское (пMo); 27 – Куналей III (пMo); 28 – Куналей I и II (пMo); 29 – Вершинное (пAu); 30 – Леоновское (пMo); 31 – Одицарское (пFI); 32 – Харитоновское (мMo); 33 – Барыкинское (пFI); 34 – Шено-Байдал (пMo); 35 – Шалоты (пMo); 36 – Сахын-Булагское (пFI); 37 – Журавлиное (мU); 38 – Галтайское (пFI); 39 – Ханайское (пU); 40 – Хэлтэгейское (мFI); 41 – Таёжное (пFI); 42 – Проявление 6 (пFI); 43 – Урминское (мU+Be); 44 – Ара-Таширское (мFI); 45 – Наранское (сFI); 46 – Убур-Таширское (мFI); 47 – Сланцевое (мU); 48 – Иройское (пTi); 49 – Подлопатинское (пMo); 50 – Нижне-Чикойское (мFI); 51 – Вирхэ (пAu); 52 – Новопапловское (пMo); 53 – Шинистуйское (пFI); 54 – Новопапловское I (пFI); 55 – Брянское (пU); 56 – Брянское (Колтыгейское) (пMo); 57 – Кусотинское (пU); 58 – Аршанское (пTR); 59 – Номто-Шибирское (пFI); 60 – Майсотское (пMo); 61 – Цолгинское (пFI); 62 – Манжинское (пFI);

63 – Арсентьевское (сTi); 64 – Верхне-Зуйское (пTi); 65 – Сутойское (пBe); 66 – Борота (пU); 67 – Верхне-Сангинское (пFl); 68 – Хамбинское (пMo); 69 – Шаральдато (мFl); 70 – Холбольджинское (пU); 71 – Тормь (пAu); 72 – Барун-Ульское (мFl); 73 – Харасунское (мFl); зона III: 74 – Тамирское (пMo); 75 – Егоровское (пCu); 76 – Могой (пCu); 77 – Одинокая Сосна (пCu); 78 – Кударинское (пCu+Mo); 79 – Ивановское (Улан-Ганга) (пMo); 80 – Гуджертуйское (пMo); 81 – Верхне-Оборское (пGe); 82 – Черемуховое (пAu); 83 – Участок Салтановский (пAu); 84 – Алтачейское (пCu); 85 – Сибильдуйское (пCu,Mo); 86 – Гочитское (пFl); 87 – Петропавловское (пAu); 88 – Водораздельное (пFl); 89 – Урто-Гуинское (пFl); 90 – Светлана (мFl); 91 – Хольтское (пFl)
Типы и масштабы месторождений и проявлений показаны в таблице и в скобках в подписуточных подписях: к – крупное, с – среднее, м – мелкое месторождение, п – проявление

Fig. 2. Diagram of the structural-mineragenetic zonation and location of ore clusters, deposits and mineral occurrences within the Selenga ore district

(based on the results of geological-surveying works of the Buryat geological service with the authors' corrections and additions)

- 1 – boundaries of the Selenga ore district; 2 – structural-mineragenetic zones (a) and ore clusters (b):
I – Pribaikalia (Cheremshanka-Oshurkovo), II – Selenga-Vitim (Kunaley, Novopavlovka, Kizhinga, Tashir), III – Chikoy-Ingoda (Tamir) deposits and mineral occurrences: I-zone: 1 – Cheremshanka (IKe); 2 – Lovtsovskoe (oPb); 3 – Oshurkovo (IAP); 4 – Shalutay (oU); 5 – Khalyuta (oSr+Ba); 6 – Usutay (oMn); 7 – Meteshikha (oNi,Co); 8 – Angyrskoe (Gornoe) (oU); 9 – Shibirka (oMo); 10 – Pervomaiskoe (sFl); 11 – Erkhirik (oFl); 12 – Berezovskoe (oU); 13 – Uda (oU); 14 – Gurulba (oU); 15 – Ivolve (sFl); 16 – Tretiakovo (sFl); 17 – Maly Mykert (Sanzhievskoe) (oAg,Pb); 18 – Verkhny Ubukun (oU); 19 – Vasilievskoe (oU); 20 – Oseryodysh (oAu); 21 – Izgib (oAu); II-zone: 22 – Ermakovskoe (lBe); 23 – Zun-Shibirskoe (oMo); 24 – Kolobkovo (sMo); 25 – Zharchikhinskoe (lMo); 26 – Nadeino (oMo); 27 – Kunaley III (oMo); 28 – Kunaley I and II (oMo); 29 – Vershinnoe (oAu); 30 – Leonovskoe (oMo); 31 – Oditsarskoe (oFl); 32 – Kharitonovo (sMo); 33 – Barykino (oFl); 34 – Sheno-Baidal (oMo); 35 – Shaloty (oMo); 36 – Sakhyn-Bulagskoe (oFl); 37 – Zhuravlinoe (sU); 38 – Galtai (oFl); 39 – Khangay (oU); 40 – Kheltegeiskoe (sFl); 41 – Tayozhnoe (oFl); 42 – Proyavlenie 6 (oFl); 43 – Urminskoe (sU+Be); 44 – Ara-Tashir (sFl); 45 – Naran (мFl); 46 – Ubur-Tashir (sFl); 47 – Slantsevoe (sU); 48 – Iroiskoe (oTi); 49 – Podlopatinskoe (oMo); 50 – Nizhny Chikoy (sFl); 51 – Virkhe (oAu); 52 – Novopavlovka (oMo); 53 – Shinistuiskoe (oFl); 54 – Novopalovskoe I (oFl); 55 – Bryanskoe (oU); 56 – Bryanskoe (Kolytgeiskoe) (oMo); 57 – Kusoty (oU); 58 – Arshan (oTR); 59 – Nomto-Shibirskoe (oFl); 60 – Maisotskoe (oMo); 61 – Tsolga (oFl); 62 – Manzhinskoe (oFl); 63 – Arsentievo (mTi); 64 – Verkhny Zuy (oTi); 65 – Sutoy (oBe); 66 – Borota (oU); 67 – Verkhne-Sanginskoe (oFl); 68 – Khambinskoe (oMo); 69 – Sharaldato (sFl); 70 – Kholboldzhinskoe (oU); 71 – Torm (oAu); 72 – Barun-Ulskoe (sFl); 73 – Kharasunskoe (sFl); III-zone: 74 – Tamir (oMo); 75 – Egorovskoe (oCu); 76 – Mogoy (oCu); 77 – Odiнокая Sosna (oCu); 78 – Kudara (oCu+Mo); 79 – Ivanovka (Ulan-Ganga) (oMo); 80 – Gudzhertuy (oMo); 81 – Verkhny Obor (oGe); 82 – Cheryomukhovoe (oAu); 83 – Uchastok Saltanovsky (oAu); 84 – Altahey (oCu); 85 – Sibilduiskoe (oCu,Mo); 86 – Gochitskoe (oFl); 87 – Petropavlovka (oAu); 88 – Vodorazdel'noe (oFl); 89 – Urto-Guinskoe (oFl); 90 – Svetlana (sFl); 91 – Kholtskoe (oFl)

Types and scales of deposits and mineral occurrences are shown in the table and brackets under the figure 2: I – large, m – medium, s – small deposits, o – occurrence

им. Н.М. Федоровского (В.Т. Покалов, С.В. Болохонцева, В.В. Васин), Геологического института СО РАН (Г.С. Рипп, Ф.Г. Рейф, Е.Д. Бажеев, А.А. Савченко) и других организаций. Подробное описание этого месторождения можно найти в опубликованных работах [23, 25–28] и др.

В геологическом строении месторождения принимают участие в основном интрузии бичурского комплекса (лейкограниты, порфировидные граниты, кварцевые сиениты с базитами) с U-Pb возрастом по цирконам 285–286 млн лет [29]

и куналейского комплекса поздней перми – раннего триаса (субщелочные и щелочные граниты и сиениты), которые прорывают верхнепермские вулканогенные образования алентуйской свиты (трахиты, трахириолиты, игнимбриты, трахиандезито-базальты и их туфы). Позже них формировались позднекуналейские интрузии субщелочных лейкократовых гранитов и сиенитов, а также гранит-порфиров соготинского субвулканического комплекса среднего-позднего триаса, на завершающем этапе которого сформировалась собственно Жарчихинская рудно-

эксплозивная структура. Она представлена концентрически-зональным телом полимиктовых и мономиктовых брекчий с кольцевыми и коническими дайками, ассоциирующими с брекчиевым сооружением. Становление ее происходило в три этапа: 1) eksploзивные, существенно мономиктовые брекчии по граносиенитам и сиенитам калишпатизированным; 2) периферические брекчии по боковым породам, дайки трахириолитов, трахитов, микросиенитов; 3) эруптивные, существенно полимиктовые брекчии по гранитам, кварцевым сиенитам, альбитизированным сиенитам. Выход рудоносных брекчиевых пород на поверхность имеет эллипсоидную форму 670×300 м, вытянутую на северо-восток. По данным бурения до глубины 800 м они слагают крутопадающее субвертикальное штокообразное тело. Отмечается отчетливая приуроченность этой трубчатой структуры к узлу пересечения разнонаправленных разрывов. До 15 % объема постройки слагают дайки. Они имеют в основном гранитный и сиенитовый состав. Большинство даек ориентировано на северо-восток. Дайки преимущественно дорудные. Ранние из них представлены микросиенитами, микрограносиенитами и трахириолитами. Позднее сформировались дайки порфировидных гранитов, риолитов и пегматитов. Установлены также маломощные дайки щелочных гранитов, образовавшиеся после молибденовых, кварц-флюоритовых и кварц-пиритовых прожилков.

Месторождение представлено почти вертикальным трубообразным телом минерализованных эруптивных брекчий соготинского комплекса. Оруденение практически совпадает с телом брекчий. Минерализация представлена молибденитом, пиритом и флюоритом. Молибденит сосредоточен в молибденит-кварцевых и молибденитовых прожилках, а также в виде тонкой вкрапленности в цементе брекчий. Содержание его в

штокверке варьирует от тысячных долей до 1 % при среднем содержании 0,088 %. Содержание флюорита в рудном теле варьирует от десятых долей до 2–5 %, редко достигая больших значений. В целом флюорит распространен на всем месторождении. Некоторое увеличение количества флюорита фиксируется в участках повышенной бериллиеносности. Наличие бериллиевой минерализации флюорит-фенакит-берtrandитового типа является характерной особенностью данного месторождения. Бериллий неравномерно распределен на месторождении. Основная его масса была сформирована в предрудный этап.

Месторождение разведано. Его запасы в контуре карьера по категории С₁ и С₂ составляют: Мо общего – 61,2 тыс. т, Мо сульфидного – 56,1 тыс. т при содержаниях соответственно 0,091 и 0,08 % и коэффициенте рудоносности 0,76. Около 30 % запасов составляют богатые руды с содержанием Мо 0,153 %. На глубинах 400–600 м отмечено увеличение концентрации Мо до 0,5 %. Забалансовые запасы вне контура карьера составляют: Мо общего – 19,6 тыс. т, Мо сульфидного – 18,3 тыс. т при содержаниях соответственно 0,085 и 0,08 % и коэффициенте рудоносности 0,63. Прогнозные ресурсы категории Р₁: руды – 60 млн т; Мо общего – 50 тыс. т; Мо сульфидного – 48,1 тыс. т при содержании 0,078 %. Зона окисления имеет среднюю мощность 47 м и включает в себе 7 % общих запасов. Оценены также ресурсы по категории Р₁ серы пиритной – 1,2 млн т и флюорита – 1,4 млн т при содержаниях 0,6 и 1,52 % соответственно. Горнотехнические условия благоприятны для открытой отработки месторождения. Флотационно-гидрометаллургическим обогащением первичных руд возможно извлечение до 91 %, а подземным выщелачиванием окисленных руд – до 70–80 % молибдена. Месторождение в настоящее время законсервировано [2, 30].

Харитоновское месторождение молибдена приурочено к штоку лейкогранитов, гранит-порфиров и автомагматических брекчий соготинского комплекса среднего-верхнего триаса – ранней юры. U-Pb возраст лейкогранитов по циркону составляет 194–195 млн лет [29]. Они прорывают щелочные граниты и сиениты позднекуналейского комплекса с возрастом 230–229 млн лет [15, 29]. Размеры штока в плане – 800×1100 м, на глубину прослежено более 500 м. Наиболее оруденелая часть штока, совпадающая с контуром тела магматических брекчий (А.К. Извеков и др., 1972) [25], имеет с поверхности размер 400×700 м. Зона окисления на месторождении распространена до глубины 6–70 м.

Сложен штокверк кварц-молибденитовыми, молибденитовыми, пиритовыми, кварц-пиритовыми прожилками. В прожилках в небольшом количестве установлены халькопирит, сфалерит, галенит, шеелит. Плотность прожилков неравномерная, выделено 4 рудных тела. Они располагаются вдоль южного контакта штока гранит-порфиров. Предполагаемая длина первого тела – 760 м, протяженность по падению – более 500 м, мощность – 9,3 м, среднее содержание молибдена – 0,053 %; второго – соответственно 360 и 350 м, содержание 0,043 %; третьего – 730, 800 и 137 м, содержание 0,062 %; четвертого – 860, 700 и 334 м, содержание 0,052 % [23]. В рудах содержится шеелит (содержание триоксида вольфрама – 0,03–0,04 %). Указанные содержания молибдена занижены из-за установленного интенсивного избирательного истирания керна при бурении. Это не позволило отнести часть запасов месторождения, изученных наиболее детально, к категории С₂. Прогнозные ресурсы категории Р₁ без учета избирательного истирания керна составляют: руды – 82 млн т, молибдена – 55 тыс. т при явно заниженном содержании 0,067 %. Разработка таких руд нерента-

бельна. Однако, если учесть, что фактическое содержание в рудах значительно выше определенного по дефектному керновому опробованию, а также благоприятные географо-экономические условия месторождения, то есть основание выделить прогнозные ресурсы, которые будут отвечать требуемым кондициям. Поэтому на месторождении необходимо провести дополнительное изучение фактического содержания молибдена в рудах (В.В. Кошкин и др., 1999).

Колобковское месторождение молибдена изучено на стадии предварительной разведки (В.Ф. Барский, Н.В. Коледенко, 1981). Представляет собой линейную штокаверковую зону субмеридионального простирания в поле гранитов соготинского комплекса среднего-верхнего триаса. Штокаверковая зона размером 1000×50 м в плане изучена на глубину до 400 м. Минерализация представлена молибденитом, пиритом, магнетитом, гематитом и флюоритом. Околорудные изменения – пиритизация, хлоритизация и эпидотизация. Горнотехнические условия благоприятны для открытой отработки. Запасы молибдена по категории С₁ – 20 тыс. т, ресурсы категории Р₁ – 8 тыс. т при содержаниях 0,08 % (В.С. Платов и др., 2000).

Леоновское проявление молибдена приурочено к контакту гранит-порфиров соготинского комплекса среднего-верхнего триаса – ранней юры с породами алектуйской свиты вехней перми. Субизометричный в плане штокверк размером 170×175 м прослежен на глубину до 300 м. Минерализация представлена молибденитом, пиритом, халькопиритом, галенитом и флюоритом. Молибденит сосредоточен в молибденит-кварцевых прожилках, реже – в виде вкрапленности. Прогнозные ресурсы по категории Р₁ составляют 4,05 тыс. т молибдена при среднем содержании 0,071 %. Леоновское проявление после проведения соответствующих работ может быть

переведено в ранг малого месторождения, качество руд которого сопоставимо с известными Жарчихинским и Колобковским месторождениями (А.А. Барская и др., 1984; В.С. Платов и др., 2000).

Надеинское проявление молибдена изучено поисковыми работами (А.А. Карбаинов и др. 1979). Оно приурочено к эндо- и экзоконтактам гранит-порфиров с гранитами соготинского комплекса среднего-верхнего триаса – ранней юры. Представляет собой штокверк размером 1500×1200 м в плане и до 130 м на глубину. По опробованию выделяются два рудных тела. Первое (верхнее) в основном эродировано. Минерализация его представлена вкрапленностью крупночешуйчатого молибденита, редко молибденитовыми и молибденит-кварцевыми прожилками. Во втором (нижнем) сосредоточены основные ресурсы проявления. Его размеры в плане – 900×600 м. Рудный штокверк представлен молибденит-кварцевыми, молибденит-пирит-кварцевыми и молибденитовыми прожилками, реже – вкрапленностью молибденита. Прогнозные ресурсы категории P_1 – 58 тыс. т молибдена при среднем содержании 0,066 % и коэффициенте рудоносности 0,77. Несмотря на низкие содержания молибдена в рудах, по ресурсам Надеинское проявление вдвое превосходит Колобковское месторождение (В.С. Платов и др., 2000).

В Новопавловском рудном узле обнаружены и изучены Новопавловское молибденовое месторождение и Подлопатинское проявление, а также ряд флюоритовых и золоторудных объектов (Л.И. Лешуков и др., 1960).

Новопавловское месторождение приурочено к штоку гранит-порфиров соготинского комплекса [22]. С поверхности шток картируется в виде удлиненного в северо-восточном направлении эллипсоидного тела размером 1×0,5 км и сложен сильно измененными гранит-порфирами и мелкозернистыми лейкогранитами.

Месторождение представлено выходящей на поверхность залежью промышленных молибденовых руд, приуроченной к штоку гранит-порфиров. В плане залежь имеет форму замкнутого кольца шириной от 30 до 180 м, погружающегося от центра. Мощность ее составляет от 70 до 100 м. В пределах залежи выделено два рудных тела (верхнее и нижнее), залегающих в виде крутопадающих (35–55°) полос оруденелых пород, разделенных безрудным интервалом мощностью от 50 до 70 м. Максимальная глубина подсечения рудных горизонтов составляет 290 м. Оруденение приурочено к интенсивно трещиноватым и дробленным породам, содержание молибдена варьирует от 0,012 до 0,28 %. Молибденовые руды преимущественно вкрапленные, однако наблюдаются и рудные прожилки. Наиболее богатые руды с содержанием молибдена до 0,2–1 % представлены кварц-молибденитовыми, кварц-молибденит-пиритовыми прожилками. Общее количество таких руд не превышает 5–7 %. Прогнозные ресурсы категории P_1 подсчитаны только по нижнему рудному телу, они составляют 57 тыс. т в рядовых и бедных рудах, в том числе 18 тыс. т в богатых рудах (В.В. Кошкин и др., 2002).

В Чикой-Ингодинской структурно-минерагенической зоне выделен перспективный Тамирский рудный узел с молибденовыми, медно-молибденовыми и медными проявлениями.

Ивановское проявление представлено кварц-молибденитовым штокверком, локализованным в бимодальных базальт-риолитовых вулканитах тамирской свиты верхней перми, прорванных дайками микродиоритов, диоритовых порфиров, гранит-порфиров [31]. Рудоконтролирующей структурой является Чикой-Кударинская зона разломов. Штокверк овальной формы вытянут в субширотном направлении площадью 2,7 км². Включает ядро площадью 1,5 км² со средним содержанием молибдена до 0,05 %,

окаймленное прожилково-жильными зонами с содержанием молибдена до 0,03 % (Я.М. Яблоков и др., 1955). На глубине выявлено несколько рудных зон с содержанием молибдена 0,03–0,05 % мощностью 6–250 м. Минеральный состав прожилков: кварц, калиевый полевой шпат, в незначительных количествах – турмалин, берилл, мусковит и флюорит; рудные – молибденит, пирит, халькопирит, гематит, магнетит, вольфрамит, шеллит, галенит, сфалерит, халькозин, повеллит, станнин, ковеллин, киноварь, теннантит, тетраэдрит, висмутин. Вторичные изменения вмещающих пород: калишпатизация, березитизация, вторичные кварциты. По распределению рудных элементов в первичных ореолах предполагается, что проявление сформировано в надинтрузивной зоне и имеет незначительный эрозионный срез. Прогнозные ресурсы молибдена категории P_1 оцениваются в 177 тыс. т (В.В. Кошкин и др., 2000).

Тамирское молибденовое проявление относится к жильному морфологическому типу и расположено в поле развития среднезернистых биотитовых гранитоидов бичурского интрузивного комплекса (Я.М. Яблоков и др., 1955; В.А. Новиков и др., 1973). В пределах рудопроявления широко развиты позднепермские дайки гранит-порфиров, реже аплитовидных гранитов, которые занимают около 30 % площади. Дайки имеют выдержанное субширотное простирание. Углы падения даек, как правило, крутые, близкие к вертикальному залеганию (80–90°). Протяженность их колеблется в широких пределах от 30 до 500 м при мощности от нескольких сантиметров до 6 м. К дайкам гранит-порфиров пространственно тяготеют кварцевые жилы, в которых локализуется молибденовое оруденение. В кварцевых жилах кроме молибденита присутствуют в незначительном количестве пирит, гюбнерит, рутил и нерудные – берилл, турмалин, мусковит. Кварцевые

жилы образуют три жильные зоны – западную, восточную и центральную, разделенные интервалами 150 м. В зонах жилы имеют сближенное кулисообразное расположение. Мощность жил – 0,1–0,3 м, длина – 30–40 м, единичные жилы протягиваются до 50–150 м. Простирание жил субширотное, с падением на север. Кварц, слагающий жилы, молочно-белый, светло-серый мелко-среднезернистый, иногда крупнокристаллический, представлен одной генерацией, относится к высокотемпературным разностям. Молибденит мелкочешуйчатый, образует в зальбандах жил гнезда и прожилки, частично окислен – ферримолибдит. Вмещающие породы вблизи кварцевых жил (10–20 см) грейзенизированы, в них молибденит присутствует в виде тонкой рассеянной вкрапленности. Содержание молибдена колеблется от 0,003 до 0,3 %. Прогнозные ресурсы молибдена категории P_2 – 185 тыс. т (В.В. Кошкин и др., 2000).

Мало-Кударинское медно-молибденовое проявление штокеркового типа расположено в осевой части Кударинской гряды в зоне Чикой-Кударинского разлома (В.А. Новиков и др., 1973). Основное рудное поле сложено габброидами и гранитоидами джидинского комплекса раннего палеозоя, включающими ксенолиты сланцев и метавулканитов катаевской свиты неопротерозоя-раннего палеозоя. В северо-западной части участка породы рудного поля перекрыты кислыми вулканокластитами тамирской свиты (P_2). В центральной части участка в местах пересечения основных разрывов субширотного направления с субмеридиональным разломом раннепалеозойские гранитоиды прорваны дайками и небольшими штоками гранит-порфиров бичурского комплекса (P_2). Рудопроявление приурочено к штокам гранитоидов, в апикальных частях которых оконтурены два рудоносных штокерка – Северный и Южный. Северный штокерк имеет

изогнутые округлые очертания, несколько удлинены в северо-восточном направлении. Размеры штокерка – 1300×800 м. Нижняя граница находится на глубине 280 м. Южный штокер (500×200 м) расположен в 1,5 км южнее Северного. Породы в пределах штокерков прокварцованы, альбитизированы, участками калишпатизированы, биотитизированы и в значительной степени грейзенизированы. Оруденение представлено первичными и вторичными прожилково-вкрапленными рудами, распространенными в основном в центральной части Северного рудного штокерка. По периферии рудных штокерков в пределах основных рудоконтролирующих структур и первичных ореолов рассеяния отмечаются слабо минерализованные породы с преимущественно прожилковым характером оруденения. Главными рудными минералами зоны первичных руд являются молибденит, халькопирит (1–2 %), пирит (1–3 %), ильменит (до 1 %), рутил (до 1 %), реже встречаются магнетит, гематит, халькозин, борнит, ковеллин, сфалерит, галенит. В числе нерудных минералов главные – кварц, полевошпат и серицит, составляющие до 90–95 % массы руды. Сопутствующими полезными компонентами являются серебро (до 1 г/т) и золото (0,05–0,1 г/т). Первичные руды халькопиритовые, вкрапленные и прожилково-вкрапленные, среднее содержание меди – 0,3 %, молибдена – 0,01 %. Прогнозные ресурсы категории Р₁ Мало-Кударинского рудопроявления суммарно оцениваются следующим образом: меди – 3087 тыс. т, молибдена – 52 тыс. т [32]. По генетическому типу оно относится к медно-порфировой формации и сопоставляется с месторождением Эрдэнэтуин-Обо в Северной Монголии.

Бериллий. В пределах Селенгинского рудного района уникальным по крупности объектом стратегического минерального сырья является Ермаковское бериллиевое месторождение. Оно было

выявлено Г.А. Ермаковым в 1964 г. в результате геолого-съемочных работ масштаба 1:200000 в северо-западной части Кижингинской мезозойской впадины. В последующем в результате детальной разведки, петролого-геохимического изучения месторождения, промышленной оценки этого уникального объекта и в целом Кижингинского рудного узла и прилегающей территории Западного Забайкалья большую роль сыграли работы сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Геологического института СО РАН и других организаций. В итоге была выделена крупная Западно-Забайкальская бериллиеносная провинция, которая входит в состав регионального Селенгино-Витимского металлогенического пояса. Опубликованные монографические работы и многочисленные статьи по всесторонней характеристике Ермаковского и других месторождений бериллия Западно-Забайкальской провинции даны в источниках [23, 33–35] и других, что избавляет нас от необходимости приводить детальную характеристику этих хорошо изученных объектов.

Кижингинский рудный узел располагается в юго-восточной части Селенгинского рудного района в пределах Кижингино-Кудунской металлогенической зоны с двумя крупными месторождениями бериллия: Ермаковского фенакит-берtrandит-флюоритового и Оротского берtrandитового плутоногенно-гидротермального генезиса, расположенного в 28 км к северо-востоку от Ермаковского месторождения. По данным Д.А. Лыхина и В.В. Ярмолюка [35], месторождения приурочены к крупным ксенолитам метаморфизованных терригенно-карбонатных пород, прорванных в дорудную стадию габброидами монотойского комплекса (332±1 млн лет), дайками и

интрузиями гранитов с возрастом 325 ± 3 , 316 ± 2 и $302,5 \pm 10$ млн лет. Оруденение связывается с куналейским комплексом щелочных гранитов и сиенитов с U-Pb возрастом 226 млн лет (массив «Шток») и $227 \pm 1,5$ млн лет (массив «Сиенит»).

В пределах Оротского берtrandитового месторождения, сложенного вулканитами цаган-хунтэйской свиты с U-Pb возрастом $236,4 \pm 3,9$ млн лет, которые образовались, по-видимому, значительно раньше (~на 10 млн лет) внедрения щелочных гранитов познекуналейского комплекса – $224,8 \pm 1,3$ млн лет [7, 35]. Поэтому Оротское месторождение связывается не с вулканогенно-гидротермальным [34], а с плутоногенно-гидротермальным процессом рудообразования, так же, как и собственно Ермаковское месторождение. Формирование бериллиевой минерализации на месторождениях произошло в результате взаимодействия производных щелочно-гранитных магм с вмещающими породами [35].

На Ермаковском месторождении установлено 24 рудных тела линзовидной формы, образующих 6 рудных зон протяженностью от 20 до 170 м и мощностью от 0,5 до 23 м. Рудные тела представляют собой метасоматические залежи и зоны прожилковой минерализации в скарнированных породах. Главные рудные минералы – берtrandит, фенакит, флюорит. Фенакит (на его долю приходится около половины запасов BeO по месторождению) образует радиально-лучистые сростки размером до 4 см в диаметре. Берtrandит слагает агрегаты в виде веерообразных, сноповидных сростков. Флюорит образует обособления размером до 10 см в поперечнике. Руды – комплексные флюорит-бериллиевые. Утвержденные запасы категории C₂ составляют 19985 т BeO и 362 тыс. т CaF₂. На 1 января 1997 отработано 37 % от общих запасов металла на месторождении [36]. Однако оставшиеся в недрах запасы позволяют рассматривать

месторождение как высокорентабельный объект мирового уровня. В настоящее время Ермаковское месторождение подготавливается к дальнейшему освоению и промышленной эксплуатации [37].

Кроме Кижингинского рудного узла с промышленным типом бериллиевых месторождений на территории Селенгинского рудного района выделен Таширский рудный узел с Урминским месторождением бериллия и рядом проявлений.

Урминское гелвин-берtrandитовое месторождение находится в восточной части хребта Малый Хамар-Дабан в узле пересечения крупных разломов и включает несколько рудопроявлений: Убур-Таширское, Левобережное и Нижнее Орелокское. Месторождение тяготеет к гранитоидам повышенной щелочности, принадлежащим раннемезозойскому познекуналейскому (таширскому) интрузивному комплексу, представленному Убур-Таширским массивом. Бериллиевая минерализация локализуется в пределах этого массива, сложенного лейкогранитами, щелочными гранитами и щелочными сиенитами [34]. Дайки в его строении распространены незначительно и по составу отвечают диоритовым порфирирам и сиенит-порфирам. Минерализация, представленная гелвином и берtrandитом, накладывается на гранитную матрицу. Рудные участки на месторождении – это зоны микроклинизации и альбитизации гранитоидов, сопровождаемые бериллиевой и сульфидной минерализацией [38]. Рудные зоны на месторождении контролируются крутопадающими сбросо-сдвигами и трещинами сколового характера. Эти разломы и трещины служили каналами для гидротермальных растворов, вызвавших метасоматические и рудные процессы. В рудных зонах развиты кулисообразно расположенные рудные тела жильной, линзовидной и неправильной формы, простирающиеся преимущественно в северо-восточном направлении ($10-45^\circ$)

с падением под углом 50–70° на СВ. Выявлено 23 рудных тела, протяженность их – 50–200 м, средняя мощность – 0,6–3,14 м. Отдельные рудные тела прослежены на глубину более 200 м. На верхних горизонтах преимущественно развит берtrandит, на глубине – гельвин [35]. Среднее содержание окиси бериллия в рудных телах варьирует от 0,131 до 0,852 %. В то же время в участках, обогащенных флюоритом, бериллий присутствует в небольших количествах. С целью промышленной оценки месторождения необходимо проведение детальных геолого-разведочных работ и исследований вещественного состава и возраста руд.

Титан. К западу от Куналейского рудного узла расположены Арсентьевское месторождение и Верхне-Зуйское проявление титана, связанные с габброидами первой фазы бичурского комплекса ранней-верхней перми. По генезису титановое оруденение относится к магматическому типу, принадлежит к апатит-титано-магнетитовой габбро-анортозитовой формации.

Арсентьевское месторождение титана расположено в Моностойском хребте и приурочено к центральной части одноименного габбро-анортозитового массива. Основными рудными минералами являются магнетит и ильменит, в небольших количествах присутствуют сульфиды: пирит, пирротин, халькопирит, марказит и пентландит [39]. Постоянно отмечаются апатит и зеленая шпинель. По горным выработкам и данным магниторазведки выделено 17 рудных зон мощностью 11–300 м и протяженностью 132–1040 м, удаленных друг от друга на расстояние от 30 до 190 м. По падению они изучены на глубину 144–354 м. Простирание зон северо-восточное 50–70°, падение на юго-восток под углом 20–60°. Оконтуривание их проведено по бортовому содержанию двуокиси титана 4 %. Внутри зон выделено более 90 рудных тел с вкрапленными, густовкрапленными

и сливными рудами линзовидной, жиллообразной или неправильной формы с параметрами 3–10×50–60 м. Количество рудных минералов в сливных рудах – 80–90 %, густовкрапленных – 40–60 % и вкрапленных – до 40 %. Содержание апатита – от 3 до 25 %, зеленой шпинели – до 15 %, пирита – до 7 %, халькопирита – до 2 %, пирротина – до 16 %. На глубине количество сульфидов несколько возрастает. Количественные соотношения магнетита и ильменита в рудах обычно равны, лишь в сливных и отчасти богатовкрапленных рудах преобладает магнетит, иногда в 2–3 раза. Наиболее распространены вкрапленные руды. Средние содержания варьируют: TiO_2 – 4,09–6,37 %, сумма окислов железа – 14,68–27,96 %, P_2O_5 – 1,61–3,1 %; V_2O_5 – 0,02–0,075 %. Месторождение относится к типу крупных, с убогими титановыми рудами. Запасы TiO_2 при бортовом содержании 4 % составляют 299207 тыс. т (В.Н. Гусельников, 1959; С.М. Смирнов и др, 1958).

Верхне-Зуйское проявление приурочено к одноименному габброидному массиву, расположенному в осевой части Моностойского хребта. Массив сложен лейко- и оливинowymi габбро, реже – габбро-анортозитами и анортозитами. Среднее содержание TiO_2 по массиву – 2,84 %. Наиболее оруденелыми являются лейкогаббро, содержащие TiO_2 от 3 до 7,74 %. Оливиновые габбро и габбро-анортозит характеризуются значительно более низкими содержаниями TiO_2 – соответственно 1,71 и 1,95 %. Рудная минерализация распределена неравномерно и представлена ильменитом и титаномагнетитом. Выделяется три типа оруденения: бедновкрапленное, вкрапленное и реже богатовкрапленное. Бедновкрапленные руды характеризуются содержанием TiO_2 в количестве 3–5 %, вкрапленные руды – 5–7 %. Аналогично Арсентьевскому месторождению богатые руды локализованы в рудных зонах, характеризу-

ющихся повышенным содержанием полезных компонентов. Таких зон выделено три: 2250×254, 2270×261 и 1120×229 м. По ним подсчитаны запасы TiO_2 по категории C_2 в количестве 317,3 млн т (В.Н. Гусельников, 1959).

Медь. Медная минерализация представлена несколькими проявлениями гидротермального плутогенного генезиса молибден-медно-порфировой рудной формации, парагенетически связанной с гранитоидами бичурского комплекса нижней-верхней перми. Эти проявления находятся за пределами рудных узлов (см. рис. 2). Второстепенное значение имеет минерализация самородной меди в трахибазальтах унгуркуйской свиты (C_3-P_1), которая распространена в Тамирском рудном узле (Р.Ц. Очиров и др., 1992).

Золото. Рудное золото представлено отдельными проявлениями золото-кварцевой и золото-серебро-сульфидной формации и относится к гидротермально-постмагматическому плутогенному генетическому типу (проявления Вирхе, Вершинное, Осередыш и Изгиб). Средне-взвешенное содержание золота составляет 0,1405 г/т. Прогнозные ресурсы золота категории P_2 для участка Вирхе составляют 10150 кг (В.В. Кошкин и др., 2002).

Уран. Урановая минерализация в Селенгинском рудном районе представлена двумя месторождениями и девятью проявлениями (Ю.Н. Воронов, 1999). Выделяется два генетических типа: гидротермальный плутогенный и гидрогенный. Гидротермальная урановая минерализация развита в пределах мезозойских вулканно-тектонических депрессий и представлена Журавлиным и Сланцевым месторождениями, а также Хангайским, Верхне-Убукунским, Васильевским проявлениями. Оруденение относится к урановорудной формации в аргиллизитах и полевошпатовых метасоматитах вулканно-тектонических структур, обычно

приурочено к зонам дробления пород. Вторичные изменения отмечаются в виде окварцевания, калишпатизации, аргиллизации, флюоритизации, пиритизации и хлоритизации. Месторождения и проявления характеризуются сходными чертами геологического строения [40].

Флюорит. На данной территории известно 1 среднее по запасам, 11 малых месторождений и 16 проявлений флюорита. Месторождения и проявления относятся к гидротермальному генетическому типу, к флюорит-кварцевой аргиллизитовой рудной формации и характеризуются близкими чертами геологического строения, качеством и технологическими свойствами руд [41]. Наибольшее количество месторождений и проявлений флюорита Селенгинского рудного района расположено в Таширском (Наранское месторождение) и Новопавловском (Нижне-Чикойское месторождение) рудных узлах. Общие разведанные запасы флюоритовых руд по категории $A+B+C_1$ составляют 1621 тыс. т. при среднем содержании 31,15 % (В.В. Кошкин и др., 2002).

Редкоземельные элементы. Комплексная редкоземельно-барий-стронциевая минерализация сосредоточена вдоль Гильберинского разлома и связана с карбонатитами халютинского комплекса раннего мела (Г.С. Рипп и др., 2000). Халютинское, Верхне-Халютинское, Аршан-Халютинское и Верхне-Шалутайское проявления расположены в Черемшано-Ошурковском рудном узле (П.И. Радченко и др., 1978; Е.С. Гольдберг, 1990).

Апатит. Ошурковское месторождение расположено в Черемшано-Ошурковском рудном узле. Месторождение разведывалось геологами Бурятского геологического управления и связывалось с массивом диоритов и сиенито-диоритов позднего протерозоя (С.В. Костромин и др., 1969). По этим данным с использованием детальных структурно-геологических и петрографических

исследований был написан ряд работ, в которых доказывался главным образом постмагматический гидротермально-метасоматический генезис оруденения, связанный с формированием апатитоносных габбро-диоритов и сиенито-диоритов, которые широко распространены в Западном Забайкалье [42–44]. В дальнейшем на Ошурковском массиве были проведены минералого-геохимические и изотопно-геохронологические исследования, в результате которых было показано, что апатитовое оруденение также связано с халютинским комплексом карбонатитов раннего мела [45]. Месторождение крупное по запасам, учитывается государственным балансом и находится в нераспределенном фонде. Месторождение детально разведано и подготовлено к эксплуатации (В.Н. Савельев и др., 1988).

Кварцевое сырье. Черемшанское месторождение было открыто коллективом Зырянской партии Бурятского геологического управления в 1965–1966 гг. в ходе геологической съемки масштаба 1:50000 среди верхнепротерозойских осадочно-терригенных отложений Восточного Прибайкалья (О.В. Соколов, Ю.В. Плотников, 1972). В последующем было установлено, что данное месторождение кремнеземного сырья представляет собой крупный объект высокочистых кварцитовидных песчаников [46, 47]. Запасы кварцита на 1 января 2007 г. составляли, тыс. т: категории В – 2397, С₁ – 10443, С₂ – 2275; в т. ч. в контуре карьера: В – 2521, С₁ – 8156. Состав примесей, менее, %: Fe₂O – 0,1, Al₂O₃ – 0,2, CaO – 0,005. Республика Бурятия располагает и другими крупными месторождениями высококачественного кварцевого сырья (Чулбонское, Атарханское, Бурал-Сардыкское и др.) и имеет все предпосылки, чтобы стать одним из основных производителей и экспортеров поликристаллического кремния и автономных систем энергоснабжения в объеме до 1/3 мирового оборота [30].

Геодинамические обстановки и условия формирования месторождений

История геодинамического развития Забайкалья, в том числе Селенгинского рудного района, в позднем палеозое – раннем мезозое (среднем-позднем карбоне перми и триасе) была обусловлена взаимодействием Сибирского континента с Монголо-Охотским океаном [48]. Последний, согласно реконструкциям, в конце карбона и перми достиг максимальных размеров и сохранял свою субмеридиональную ориентировку. По восточной окраине Сибирского континента в среднем карбоне – ранней перми существовала геодинамическая обстановка активной континентальной окраины андийского типа [8].

Было установлено, что активные вулканические извержения начались в среднем-позднем карбоне в связи с заложением крупной рифтогенной трансрегиональной структуры – Селенгино-Витимского вулcano-плутонического пояса – в тылу раннекаледонской активной континентальной окраины Сибирского континента и началом формирования спрединговых океанических прогибов Монголо-Охотского океана. Интенсивный субдукционный магматизм в пределах активной континентальной окраины привел не только к формированию в ее тылу девон-каменноугольных вулcano-тектонических структур Западного Забайкалья [49], но и к массовому внедрению коровых анатектических гранитов баргузинского комплекса с возрастом 330–290 млн лет, которые сформировали крупнейший в мире Ангаро-Витимский батолит площадью около 150000 км². Мощный гранитоидный магматизм содействовал термальному прогреву территории Западного Забайкалья, что привело в дальнейшем к коровомантийному взаимодействию и формированию в последующем тесно взаимосвязанных вулcanoгенных толщ, базитов и гранитоидов разной щелочности и кислотности.

В Селенгинском рудном районе начальные импульсы трахиандезит-риолитового вулканизма (гунзанская толща) были приурочены к северному и южному бортам пояса, а также и к его западному флангу. Этот импульс во времени захватывал средний-верхний карбон – нижнюю пермь. В интрузивном магматизме от ранних к более поздним выделяются следующие ассоциации пород: 1) известково-щелочные и субщелочные граниты и кварцевые сиениты с синплутоническими базитами зазинского комплекса с возрастом 305–285 млн лет; 2) кварцевые сиениты и монцониты с базитами нижнеселенгинского комплекса с возрастом 285–278 млн лет. Состав магматических пород зазинского и нижнеселенгинского комплексов подтверждает их корово-мантийную природу [50]. Эти магматические процессы проявились далеко за пределами Ангара-Витимского батолита на территории Юго-Западного Забайкалья и Северной Монголии.

В последующем, в верхней перми и раннем триасе, геодинамическая обстановка усложнилась в связи с формированием рифтогенных вулканно-тектонических структур в тылу активной континентальной окраины. В верхней перми произошли площадные трахибазальтовые излияния (унгуркуйская, тамрская толщи), которые сопровождались формированием силлов и лакколитоподобных тел долеритов и габбро-сиенитов, а также бимодальных серий с комендитами и щелочными гранитами куналейского комплекса. Последние наиболее широко распространены в пределах Селенгинского рудного района и относятся к верхней перми и нижнему триасу.

Более поздняя, мезозойская история геодинамического развития региона была связана с взаимодействием Сибирского континента с Палеопацификом и его заливом – Монголо-Охотским океаническим бассейном. По складчатому обрамлению юга Сибирской платформы на

территории Забайкалья на месте Монголо-Охотского пояса в мезозое существовала геодинамическая обстановка калифорнийского или монголо-охотского типов [8, 48]. Она характеризовалась надвиганием Сибирского континента на структуры Монголо-Охотского океанического бассейна, в результате чего образовались зоны «рассеянного» рифтогенеза и «распыленного» вулканизма. Отличительной особенностью этого процесса явилось сочетание обстановок сжатия и растяжения, поэтому здесь образовались многочисленные вулканотектонические структуры, сложенные вулканитами как островодужного, так и внутриплитного типов с редкометалльными и другими гранитоидами различной щелочности и кислотности. С последними связаны основные эндогенные месторождения Селенгинского рудного района, определяющие его металлогенический облик.

Выполненные в последние годы геохронологические исследования позволили расшифровать историю вулканических процессов в вышеуказанных структурах и раскрыть их геодинамическую природу. Было установлено, что на территории Забайкалья мезозойская вулканическая деятельность была сконцентрирована в ряде вулканических областей и зон и контролировалась мантийными плюмами горячего поля мантии [8, 10]. По-видимому, динамика развития плюмов носила прерывисто-пульсационный характер. Каждому импульсу активности плюма соответствовал определенный комплекс вулканических и плутонических образований, с которыми связаны выявленные месторождения минерального сырья в Селенгинском рудном районе.

Прогнозы и перспективы промышленного освоения Селенгинского рудного района

Известно, что стратегия экономического развития Республики Бурятия во многом базируется на освоении минерально-сырьевой базы благодородных,

черных, легирующих, цветных и редких металлов (молибдена, вольфрама) и топливно-энергетического сырья, в том числе стратегического минерального сырья (бериллия, золота, платины, свинца, серебра, меди, никеля, хрома, титана, редких и редкоземельных элементов) [23, 25, 51]. Изученные авторами данной статьи ранее в рамках Программы Президиума РАН Курбино-Еравнинский, Северо-Байкальский, Восточно-Саянский (Окинский), Джидинский рудные районы [4, 5, 52, 53] в настоящее время рассматриваются как крупные промышленные узлы минерально-сырьевого профиля, которые в будущем могут стать основой для формирования Восточно-Бурятского, Северо-Байкальского и Окино-Джидинского территориально-промышленных комплексов как центров экономического развития Сибири и Республики Бурятия [54]. В связи с этим большую перспективу и экономическую ценность представляют легкодоступные минеральные ресурсы

Селенгинского рудного района с экономически развитой инфраструктурой [30, 37]. Здесь обнаружены и разведаны крупные бериллиевое Ермаковское, молибденовое Жарчихинское, титановое Арсентьевское, апатитовое Ошурковское, кварцитовое Черемшанское месторождения, Халютинское редкометалльно-редкоземельное рудопроявление в карбонатитах и более мелкие недоразведанные проявления молибдена, бериллия, урана, меди, золота и других полезных ископаемых, которые при изменении ситуации на мировом рынке могут быть с успехом использованы при модернизации экономики исследованного региона и России в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 1.4П «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче» и частично гранта РФФИ № 15-05-01633а.

Библиографический список

1. Геологическая карта Юга Восточной Сибири и Северной части МНР. Масштаб 1:1500000 / гл. ред. А.Л. Яншин. Л.: Изд-во Картфабрики ВСЕГЕИ, 1980.
2. Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Мухин В.Н., Суслова С.В., Платова Е.В., Большакова Т.В., Шеломенцева Т.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2009. 271 с.
3. Гордиенко И.В., Булгатов А.Н., Руженцев С.В., Минина О.Р., Климук В.С., Ветлужских Л.И., Некрасов Г.Е., Ласточкин Н.И., Ситникова В.С., Метелкин Д.В., Гонегер Т.А., Лепехина Е.Н. История развития Удино-Витимской островодужной

системы Забайкальского сектора Палеоазиатского океана в позднем рифее – палеозое // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 589–614.

4. Гордиенко И.В., Нефедьев М.А. Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 114–124. <https://doi.org/10.7868/S0016777015020021>

5. 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 место-

рождений. 2018. Т. 60. № 1. С. 1–36.
<https://doi.org/10.1134/S1075701518010038>

6. Гордиенко И.В. Средне- и верхнепалеозойский внегеосинклинальный магматизм Саяно-Байкальской горной области // Тектоника Сибири. Т. 7. М.: Наука, 1976. С. 82–90.

7. Гордиенко И.В. Палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса. М.: Наука, 1987. 240 с.

8. Гордиенко И.В., Кузьмин М.И. Геодинамика и металлогения Монголо-Забайкальского региона // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 11. С. 1545–1562.

9. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Будников С.В., Ковач В.П. Тектоно-магматическая зональность, источники магматических пород и геодинамика раннемезозойской Монголо-Забайкальской магматической области // Геотектоника. 2002. № 4. С. 42–63.

10. Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Кудряшова Е.А. Рифтогенный магматизм западной части раннемезозойской Монголо-Забайкальской магматической области: результаты геохронологических исследований // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 6. С. 669–675.
<https://doi.org/10.7868/S086956521724015X>

11. Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д. Геодинамика позднепалеозойского батолитообразования в Западном Забайкалье // Петрология. 2017. Т. 25. № 4. С. 395–418.
<https://doi.org/10.7868/S0869590317030049>

12. Литвиновский Б.А., Ярмолюк В.В., Воронцов А.А., Журавлев Д.З., Посохов В.Ф., Сандиминова Г.П., Кузьмин Д.В. Позднетриасовый этап формирования Монголо-Забайкальской щелочногранитоидной провинции: данные изотопно-геохимических исследований // Геология и Геофизика. 2001. Т. 42. № 3. С. 445–456.

13. Цыганков А.А., Литвиновский

Б.А., Джань Б. М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1249–1276.

14. Jahn B.M., Litvinovsky B.A., Zandievich A.N., Reichow M.K. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance // Lithos. 2009. Vol. 113. P. 521–539. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.015>

15. Reichow M.K., Litvinovsky B.A., Parrish R.R., Saunders A.D. Multi-stage emplacement of alkaline and peralkaline syenite-granite suites in the Mongolian-Transbaikalian Belt, Russia: Evidence from U-Pb geochronology and whole rock geochemistry // Chemical Geology. 2010. Vol. 273 (1–2). P. 120–135.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.02.017>

16. Гордиенко И.В., Климук В.С. Бимодальной вулканизм Тугнуйской рифтогенной впадины (Забайкалье) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 5. С. 23–37.

17. Ярмолюк В.В., Воронцов А.А., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Байкин Д.Н., Сандиминова Г.П. Эпохи бимодального и щелочногранитного магматизма в Западном Забайкалье: геохронологические данные по району Тугнуйской впадины // Доклады Академии наук. 2000. Т. 373. № 1. С. 78–83.

18. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Мантийные плюмы северо-восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 153–184.

19. Donskaya T.V., Windley B.F., Mazukabzov A.M., Kröner A., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Ponomarchuk V.A., Bardach G., Reichow M., Hegne E. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia // Journal of the Geologi-

cal Society. 2008. Vol. 165. P. 405–421.
<https://doi.org/10.1144/0016-76492006-162>

20. Никифоров А.В., Ярмолюк В.В., Покровский Б.Г., Коваленко В.И., Иванов В.Г., Андреева И.А., Журавлев Д.З., Рипп Г.С., Владыкин Н.В., Коршунов В.В. Поздне-мезозойские карбонатиты Западного Забайкалья: минералогические, химические и изотопные (О, С, S и Sr) характеристики и соотношение с щелочным магматизмом // Петрология. 2000. Т. 8. № 3. С. 278–302.

21. Рипп Г.С., Кобылкина О.В., Дорошкевич А.Г., Шаракшинов А.О. Поздне-мезозойские карбонатиты Западного Забайкалья. Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН, 2000. 224 с.

22. Батурина Е.Е., Рипп Г.С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии). М.: Наука, 1984. 152 с.

23. Игнатович В.И. Минерально-сырьевая база молибдена // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 37–43.

24. Гордиенко И.В. Эволюция палеозойского магматизма и эндогенного оруденения складчатого обрамления юга Сибирской платформы и геодинамические обстановки его формирования // Тихоокеанская геология. 1992. Т. 11. № 4. С. 101–109.

25. Игнатович В.И., Филько А.С. Состояние и перспективы увеличения минерально-сырьевой базы молибдена и вольфрама в Бурятии // Химия, технология и природное сырье молибдена и вольфрама. Улан-Удэ, 1978. С. 131–140.

26. Скрипкина В.В., Верник В.Л., Рейф Л.И., Игнатович В.И., Андреев Г.В. Новая вулканическая структура с молибденовой минерализацией в Западном Забайкалье // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 264. № 6. С. 1461–1464.

27. Покалов В.Т., Болохонцева С.В., Васин В.В. Жарчихинское верхнепалеозойское проявление молибдена в брекчиевой трубке в каледонидах Западного

Забайкалья // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1985. № 7. С. 99–107.

28. Верник В.Л., Рипп Г.С. Жарчихинское молибденовое месторождение // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 2. М.: Геоинформмарк, 1995. С. 176–179.

29. Хубанов В.Б., Дугданова Е.Е., Цыганков А.А., Буянтуев М.Д. Возрастные соотношения щелочных и молибденитсодержащих гранитоидов Селенгинского молибденовнорудного района (Западное Забайкалье) // Граниты и эволюция Земли: материалы III международной геологической конференции (г. Екатеринбург, 28–31 августа 2017 г.). Екатеринбург, 2017. С. 330.

30. Бахтин В.И., Яловик Г.А., Гусев Ю.П., Игнатович В.И., Лбов В.А. Основные полезные ископаемые Бурятии // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 15–21.

31. Гордиенко И.В. Состав и возраст тамирской свиты вулканогенных пород Западного Забайкалья // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1980. № 7. С. 84–91.

32. Ефимов И.И. Кударинское молибден-медно-порфировое рудопроявление // Глобус. 2010. № 5 (13). С. 42–46.

33. Гинзбург А.И., Заболотная Н.П., Новикова М.И., Гальченко В.И. Генетические особенности флюорит-фенакит-бертландитового оруденения // Разведка и охрана недр. 1969. № 1. С. 3–10.

34. Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллиевые месторождения России. М.: ГЕОС, 2011. 353 с.

35. Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В. Западно-Забайкальская бериллиевая провинция: месторождения, рудоносный магматизм, источники вещества. М.: ГЕОС, 2015. 256 с.

36. Пехтерев С.Н., Нечепанев Е.В., Артамонова Н.А., Вологдин М.А., Духовский А.А., Еникеев Ф.И., Кожунова С.В., Круткина О.Н., Ступина Т.А., Четвериков

М.Е., Шор Г.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист М-49. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2012. 438 с.

37. Таханова С.С. Управление недрами Республики Бурятия // Разведка и охрана недр. 2017. № 9. С. 3–10.

38. Новикова М.И., Заболотная Н.П. Бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты мезозойских зон активизации // Советская геология. 1988. № 12. С. 92–100.

39. Бадмацыренова Р.А., Бадмацыренов М.В. Источники базитового магматизма Западного Забайкалья в позднем палеозое по геохимическим и изотопным данным // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 807–818.

40. Зайцев С.У. Основные особенности локализации уранового оруденения в сланцевых комплексах Наранской площади // Уран: геология, ресурсы, производство: тезисы Третьего международного симпозиума. М.: Изд-во ВИМС, 2013. С. 54.

41. Булнаев К.Б. Наранское месторождение // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 2. М.: Геоинформмарк, 1995. С. 197–203.

42. Гордиенко И.В. Апатитоносные диориты ошурского типа – новый генетический тип апатитовых месторождений // V чтения памяти академика С.С. Смирнова. Чита: Изд-во Забайкальского филиала географического общества СССР, 1970. С. 135–138.

43. Андреев Г.В., Гордиенко И.В. Кузнецов А.Н., Кравченко А.И. Апатитоносные диориты Юго-Западного Забайкалья. Улан-Удэ: Бурятское книжное изд-во, 1972. 200 с.

44. Царев Д.И., Батуева А.А. Дифференциация компонентов базитов при гранитизации (на примере Ошурковского апатитового месторождения, Западное

Забайкалье). Новосибирск: Гео, 2013. 135 с.

45. Рипп Г.С., Избродин И.А. Ласточкин Е.И., Дорошкевич А.Г., Рампилов М.О., Бурцева М.В. Ошурковский базитовый плутон: хронология, изотопно-геохимические и минералогические особенности, условия образования. Новосибирск: Гео, 2013. 163 с.

46. Борисов А.П., Гальченко В.И., Миронов А.Г., Корсунов В.М. Черемшанский кварцит – основа комплексного освоения рудных богатств Бурятии // Горный журнал. 1999. № 3. С. 1–4.

47. Царев Д.И., Хрусталева В.К., Гальченко В.И., Аюржанаева Д.Ц. Геология и генезис Черемшанского месторождения кремнеземного сырья (Западное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 4. С. 334–345.

48. Зоненшайн Л.Р., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. В 2 кн. Кн. 2. М.: Недра, 1990. 334 с.

49. Минина О.Р., Доронина Н.А., Некрасов Г.Е., Ветлужских Л.И., Ланцева В.С., Аристов В.А., Наугольных С.В., Куриленко А.В., Ходырева Е.В. Ранние герциниды Байкало-Витимской складчатой системы (Западное Забайкалье) // Геотектоника. 2016. № 3. С. 63–84. <https://doi.org/10.7868/S0016853X16030073>

50. Гордиенко И.В., Цыганков А.А. Магматизм и рудообразование в различных геодинамических обстановках Саяно-Байкальской складчатой области и сопредельных территорий // Разведка и охрана недр. 2017. № 9. С. 36–44.

51. Бахтин В.И., Яловик Г.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Бурятия до 2020 г. // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 6–15.

52. Гордиенко И.В., Булгатов А.Н., Нефедьев М.А., Орсов Д.А. Геолого-геофизические, прогнозно-металлогенические исследования и перспективы

освоения минеральных ресурсов Северо-Байкальского рудного района // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 2 (45). С. 5–18.

53. Гордиенко И.В., Рощектаев П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, структурно-металлогеническое

районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 5. С. 405–429. <https://doi.org/10.7868/S001677701605004X>

54. Минерально-сырьевой потенциал недр Российской Федерации. Т. 1. Прогнозно-металлогенический анализ / под ред. О.В. Петрова. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 224 с.

References

1. Yanshin A.L. *Geologicheskaya karta Yuga Vostochnoi Sibiri i Severnoi chasti MNR. Masshtab 1:1500000* [Geological map of the South of Eastern Siberia and the Northern part of the MPR. Scale 1:1500000]. Leningrad: Kartfabrika Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta Publ., 1980. (In Russian).

2. 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. *Gosudarstvennaia geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'e pokolenie). Aldano-Zabaikal'skaia seriia. List M-48. Ob'iasnitel'naia zapiska* [National geological map of the Russian Federation. 1:1000000 (3rd generation). Aldan-Transbaikalian series. Chart sheet M-48. Ulan-Ude. Explanatory note]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskaja kartfabrika Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta Publ., 2009, 271 p. (In Russian).

3. Gordienko I.V., Bulgatov A.N., Ruzhentsev S.V., Minina O.R., Klimuk V.S., Vetluzhskikh L.I., Nekrasov G.E., Lastochkin N.I., Sitnikova V.S., Metelkin D.V., Goner T.A., Lepekhina E.N. The Late Riphean-Paleozoic history of the Uda-Vitim island arc system in the Transbaikalian sector of the Paleasian Ocean. *Geologiya i*

geofizika [Geology and Geophysics], 2010, vol. 51, no. 5, pp. 589–614. (In Russian).

4. Gordienko I.V., Nefed'ev M.A. The Kurba-Eravna ore district of Western Transbaikalia: Geological and geophysical structure, types of ore deposits, predictive assessment, and mineral-resource potential. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2015, vol. 57, no. 2, pp. 114–124. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0016777015020021>

5. Gordienko I.V., Gorokhovskiy D.V., Smirnova O.K., Lantseva V.S., Badmatyrenova R.A., Orsoev D.A. Dzhida ore district: Geological structure, structural and metallogenic zoning, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecasts, and development prospects. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2018, vol. 60, no. 1, pp. 1–36. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S1075701518010038>

6. Gordienko I.V. *Sredne- i verkhne-paleozoiskii vnegeosinklinal'nyi magmatizm Sayano-Baikal'skoi gornoj oblasti* [Middle and Upper Paleozoic extrageosynclinal magmatism of the Sayan-Baikal mountain area]. *Tektonika Sibiri* [Tectonics of Siberia]. Vol. 7. Moscow: Nauka Publ., 1976, pp. 82–90. (In Russian).

7. Gordienko I.V. *Paleozoiskii magmatizm i geodinamika Tsentral'no-Aziatskogo skladchatovogo poyasa* [Paleozoic magmatism and geodynamics of the Central Asian

Fault Belt]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 240 p. (In Russian).

8. Gordienko I.V., Kuz'min M.I. Geodynamics and metallogeny of the Mongolian-Transbaikalian region. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1999, vol. 40, no 11, pp. 1545–1562. (In Russian).

9. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Sal'nikova E.B., Budnikov C.V., Kovach V.P. Tectonic magmatic zoning, sources of igneous rocks and geodynamics of the Early Mesozoic Mongolia–Transbaikal Province. *Geotektonika* [Geotectonics], 2002, no. 4, pp. 42–63. (In Russian).

10. Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Salnikova E.B., Travin A.V., Kudryashova E.A. Early Mesozoic Rift Magmatism of the Central Mongolia: Geochronological Evidence for Evolution of Mongolian-Transbaikalian Zoned Igneous Province. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2017, vol. 475, no. 6, pp. 669–675. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S086956521724015X>

11. Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. Geodynamics of Late Paleozoic batholith-forming processes in Western Transbaikalia. *Petrologiya* [Petrology], 2017, vol. 25, no. 4, pp. 395–418. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0869590317030049>

12. Litvinovsky B.A., Yarmolyuk V.V., Vorontsov A.A., Zhuravlev D.Z., Posokhov V.F., Sandimirova G.P., Kuz'min D.V. Late Triassic formation stage of the Mongolian-Transbaikal alkaline-granitoid province: data of isotope-geochemical studies. *Geologiya i Geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2001, vol. 42, no. 3, pp. 445–456. (In Russian).

13. Tsygankov A.A., Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Reichow M.K., Liu D.Y., Larionov A.N., Presnyakov S.L., Lepekhina Y., Sergeev S.A. Sequence of magmatic events in the Late Paleozoic of Transbaikalia, Russia (U-Pb isotope data). *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2010, vol. 51, no. 9, pp. 1249–1276. (In Russian).

14. Jahn B.M., Litvinovsky B.A., Zanzilevich A.N., Reichow M.K. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance. *Lithos*, 2009, vol. 113, pp. 521–539. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.015>

15. Reichow M.K., Litvinovsky B.A., Parrish R.R., Saunders A.D. Multi-stage emplacement of alkaline and peralkaline syenite-granite suites in the Mongolian-Transbaikalian Belt, Russia: Evidence from U-Pb geochronology and whole rock geochemistry. *Chemical Geology*, 2010, vol. 273 (1–2), pp. 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.02.017>

16. Gordienko I.V., Klimuk B.C. Bimodal volcanism of the Tugnuv riftogenic depression (TransBaikal region). *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1995, vol. 36, no. 5, pp. 23–37. (In Russian).

17. Yarmolyuk V.V., Vorontsov A.A., Ivanov V.G., Kovalenko V.I., Baikina D.N., Sandimirova G.P. Epochs of bimodal and alkaline granite magmatism in the western Transbaikal region: Geochronological data on the region of Tugnuv depression. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2000, vol. 373, no. 1, pp. 78–83. (In Russian).

18. Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Central Asia (Northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2014, vol. 55, no. 2, pp. 153–184. (In Russian).

19. Donskaya T.V., Windley B.F., Mazukabzov A.M., Kröner A., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Ponomarchuk V.A., Bardach G., Reichow M., Hegne E. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia. *Journal of the Geological Society*, 2008, vol. 165, pp. 405–421. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-162>

20. Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V., Pokrovskii B.G., Kovalenko V.I., Ivanov

V.G., Andreeva I.A., Zhuravlev D.Z., Ripp G.S., Vladykin N.V., Korshunov V.V. Late mesozoic carbonatites of western Transbaikalia: Mineralogical, chemical, and isotopic (O, C, S, and Sr) characteristics and relationships to alkaline magmatism. *Petrologiya* [Petrology], 2000, vol. 8, no. 3, pp. 278–302. (In Russian).

21. Ripp G.S., Kobylkina O.V., Doroshkevich A.G., Sharakshinov A.O. *Pozdne mezozoiskie karbonatity Zapadnogo Zabaikal'ya* [Late Mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia]. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre of Siberian Department of Russian Academy of Sciences Publ., 2000, 224 p. (In Russian).

22. Baturina E.E., Ripp G.S. *Molibdenovye i vol'framovye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaikal'ya (osnovnye cherty metallogenii i geokhimii)* [Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia (basic metallogeny and geochemistry features)]. Moscow: Nauka Publ., 1984, 152 p. (In Russian).

23. Ignatovich V.I. Mineral base of molybdenum. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2007, no. 12, pp. 37–43. (In Russian).

24. Gordienko I.V. Evolution of Paleozoic magmatism and endogenous mineralization of the folded frame of the south of the Siberian platform and the geodynamic conditions of its formation. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1992, vol. 11, no. 4, pp. 101–109. (In Russian).

25. Ignatovich V.I., Fil'ko A.S. *Sostoyanie i perspektivy uvelicheniya mineral'no-syr'evoi bazy molibdena i vol'frama v Buryatii* [Conditions of increasing the mineral material base of molybdenum and tungsten in Buryatia: state and prospects]. *Khimiya, tekhnologiya i prirodnoe syr'e molibdena i vol'frama* [Chemistry, technology and natural raw material of molybdenum and tungsten]. Ulan-Ude, 1978, pp. 131–140. (In Russian).

26. Skripkina V.V., Vernik V.L., Reif L.I., Ignatovich V.I., Andreev G.V. A new volcanic structure with molybdenum mineralization in Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady of the USSR Academy of Sciences], 1982, vol. 264, no. 6, pp. 1461–1464. (In Russian).

27. Pokalov V.T., Bolokhontseva S.V., Vasin V.V. The Zharchikha Upper Paleozoic mineral occurrence of molybdenum in the breccia pipe in the caledonides of Western Transbaikalia. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Geological series], 1985, no. 7, pp. 99–107. (In Russian).

28. Vernik V.L., Ripp G.S. *Zharchikhinskoe molibdenovoe mestorozhdenie* [The Zharchikha molybdenum deposit]. Vol. 1, b. 2. Moscow: Geoinformmark Publ., 1995, pp. 176–179. (In Russian).

29. Khubanov V.B., Dugdanova E.E., Tsygankov A.A., Buyantuev M.D. *Vozrastnye sootnosheniya shchelochnykh i molibdenitsoderzhashchikh granitoidov Selenginskogo molibdenovorudnogo raiona (Zapadnoe Zabaikal'e)* [Age correlations of alkaline and molybdenite-containing granitoids of the Selenga molybdenum-ore district (Western Transbaikalia)]. *Materialy III mezhdunarodnoi geologicheskoi konferentsii "Granity i evolyutsiya Zemli"* [Proceedings of the 3rd International Geological Conference "Granites and evolution of the Earth"]. Ekaterinburg, 2017, p. 330. (In Russian).

30. Bakhtin V.I., Yalovik G.A., Gusev Yu.P., Ignatovich V.I., Lbov V.A. The main minerals of Buryatia. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2007, no. 12, pp. 15–21. (In Russian).

31. Gordienko I.V. Composition and age of the Tamir suite of volcanogenic rocks, Western Transbaikalia. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Geological series], 1980, no. 7, pp. 84–91. (In Russian).

32. Efimov I.I. The Kudara molybdenum-copper-porphyry ore occurrence. *Globus* [Globe], 2010, no. 5 (13), pp. 42–46. (In Russian).

33. Ginzburg A.I., Zabolotnaya N.P., Novikova M.I., Gal'chenko V.I. The genetic features of fluorite-phenacite-bertrandite mineralization. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 1969, no. 1, pp. 3–10. (In Russian).

34. Kupriyanova I.I., Shpanov E.P. *Berillievye mestorozhdeniya Rossii* [Beryllium deposits of Russia]. Moscow: GEOS Publ., 2011, 353 p. (In Russian).

35. Lykhin D.A., Yarmolyuk V.V. *Zapadno-Zabaikal'skaya berillievaya provintsiya: mestorozhdeniya, rudonosnyi magmatizm, istochniki veshchestva* [West Transbaikalian beryllium province: deposits, ore-bearing magmatism, substance sources]. Moscow: GEOS Publ., 2015, 256 p. (In Russian).

36. Pekhterev S.N., Nechepaev E.V., Artamonova N.A., Vologdin M.A., Dukhovskii A.A., Enikeev F.I., Kozhunova S.V., Krutkina O.N., Stupina T.A., Chetverikov M.E., Shor G.M. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Aldan-Zabaikal'skaya. List M-49. Ob'yasnitel'naya* [National geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (3rd generation). Aldan-Transbaikalian series. Chart sheet M-49. Explanatory note]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskaja kartfabrika Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta Publ., 2012, 438 p. (In Russian).

37. Takhanova S.S. The management of mineral resources of Republic of Buryatia. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2017, no. 9, pp. 3–10. (In Russian).

38. Novikova M.I., Zabolotnaya N.P. Beryllium-bearing feldspar metasomatites of Mesozoic activation zones. *Sovetskaya*

geologiya [Soviet geology], 1988, no. 12, pp. 92–100. (In Russian).

39. Badmatsyrenova R.A., Badmatsyrenov M.V. The sources of basic magmatism in Western Transbaikalia in the Late Paleozoic (from geochemical and isotope data). *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2011, vol. 52, no. 6, pp. 807–818. (In Russian).

40. Zaitsev S.U. *Osnovnye osobennosti lokalizatsii uranovogo orudneniya v slantsevykh kompleksakh Naranskoi ploshchadi* [Main features of uranium mineralization localization in Naran area shale complexes]. *Tezisy Tret'ego mezhdunarodnogo simpoziuma "Uran: geologiya, resursy, proizvodstvo"* [Abstracts of the 3rd international symposium "Uranium, geology, resources, production"], Moscow: Fedorovsky All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources Publ., 2013, p. 54. (In Russian).

41. Bulnaev K.B. *Naranskoe mestorozhdenie* [The Naran deposit]. *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya* [Deposits of Transbaikalia]. Vol. 1, book 2. Moscow: Geoinformmark Publ., 1995, pp. 197–203. (In Russian).

42. Gordienko I.V. *Apatitnosnye diority oshurskogo tipa – novyi geneticheskii tip apatitovykh mestorozhdenii* [Apatite-bearing diorites of the Oshurkovo type – a new genetic type of apatite deposits]. *V chteniya pamyati akademika S.S. Smirnova* [V Readings to the memory of the Academician S.S. Smirnov]. Chita: Zabaikal'skii filial geograficheskogo obshchestva Publ., 1970, pp. 135–138. (In Russian).

43. Andreev G.V., Gordienko I.V., Kuznetsov A.N., Kravchenko A.I. *Apatitnosnye diority Yugo-Zapadnogo Zabaikal'ya* [Apatite-bearing diorites of the South-Western Transbaikalia]. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1972, 200 p. (In Russian).

44. Tsarev D.I., Batueva A.A. *Differentsiatsiya komponentov bazitov pri granitizatsii (na primere Oshurkovskogo*

apatitovogo mestorozhdeniya, Zapadnoe Zabaikal'e) [Differentiation of the basite components under granitization (on example of the Oshurkovo apatite deposit, Western Transbaikalia]. Novosibirsk: Geo Publ., 2013, 135 p. (In Russian).

45. Ripp G.S., Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Burtseva M.V. *Oshurkovskii bazitovyi pluton: khronologiya, izotopno-geokhimicheskie mineralogicheskie osobennosti, usloviya obrazovaniya* [Oshurskovo basite pluton: chronology, isotope-geochemical mineralogical features, formation conditions]. Novosibirsk: Geo Publ., 2013, 163 p. (In Russian).

46. Borisov A.P., Gal'chenko V.I., Mironov A.G., Korsunov V.M. Cheremshanka quartzite as a basis for the complex development of ore resources of Buryatia. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1999, no. 3, pp. 1–4. (In Russian).

47. Tsarev D.I., Khrustalev V.K., Gal'chenko V.I., Ayurzhanova D.Ts. Geology and genesis of the Cheremshanka silica deposit, Western Transbaikalia, Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2007, vol. 49, no. 4, pp. 334–345. (In Russian).

48. Zonenshain L.R., Kuz'min M.I., Natapov L.M. *Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR* [Tectonics of lithospheric plates of the USSR territory]. In 2 books, book 2. Moscow: Nedra Publ., 1990, 334 p. (In Russian).

49. Minina O.R., Doronina N.A., Nekrasov G.E., Vetluzhskikh L.I., Lantseva V.S., Aristov V.A., Naugol'nykh S.V., Kurilenko A.V., Khodyreva E.V. Early Hercynides of the Baikal-Vitim Fold System, Western Transbaikalia. *Geotektonika* [Geotectonics], 2016, no. 3, pp. 63–84. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0016853X16030073>

50. Gordienko I.V., Tsygankov A.A. Magmatism and ore formation in various

geodynamic conditions of the Sayan-Baikal Fold Region and adjacent territories. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2017, no. 9, pp. 36–44. (In Russian).

51. Bakhtin V.I., Yalovik G.A. The mineral resource base of the Buryat Republic: state and development prospects until 2020. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2007, no. 12, pp. 6–15. (In Russian).

52. Gordienko I.V., Bulgatov A.N., Nefed'ev M.A., Orsoev D.A. Geological and geophysical, forecast-metallogenic researches and exploration prospects of North Baikal ore district mineral resources. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii 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. 5–18. (In Russian).

53. Gordienko I.V., Roshchektaev P.A., Gorokhovskiy D.V. Oka ore district of the Eastern Sayan: Geology, structural-metallogenic zonation, genetic types of ore deposits, their geodynamic formation conditions, and development prospects. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2016, vol. 58, no. 5, pp. 405–429. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S001677701605004X>

54. Petrov O.V. *Mineral'no-syr'evoi potentsial nedr Rossiiskoi Federatsii* [Evaluation of raw mineral potential of the Russian Federation subsoil]. Vol. 1. *Prognozno-metallogenicheskii analiz* [Prognostic-metallogenic analysis]. Saint Petersburg: A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute Publ., 2009, 224 p. (In Russian).

Критерии авторства

Гордиенко И.В., Ланцева В.С., Бадма-
цыренова Р.А., Елбаев А.Л. написали
статью, имеют равные авторские права
и несут одинаковую ответственность за
плагиат.

Authorship criteria

Gordienko I.V., Lantseva V.S., Badmat-
syrenova R.A., Elbaev A.L. have written
the article, have equal author's rights and
bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии кон-
фликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no con-
flict of interests regarding the publication of
this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.3/.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-38-53>

ЗОНАЛЬНОСТЬ ОРУДЕНЕНИЯ И МЕТАСОМАТИТОВ В МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ГОШГАРЧАЙСКОЙ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (МАЛЫЙ КАВКАЗ, АЗЕРБАЙДЖАН)

© М.И. Мансуров^а, М.Г. Сафари^б, Б.Г. Каландаров^с,
В.М. Керимов^д, А.Г. Мамедова^е

^{а,с,е}Бакинский государственный университет,
AZ1148, Республика Азербайджан, г. Баку, ул. 3. Халилова, 23.

^бУниверситет Пайаме Нур,
П.О.19395-3697, Республика Иран, г. Тегеран, ул. Артеш.

^дАзербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
AZ1010, Республика Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, 20.

РЕЗЮМЕ. Цель. Анализ характера зональности оруденения и метасоматитов по известным медно-порфировым месторождениям Гошгарчайской рудно-магматической системы (РМС), связанной с Муровдагской группой интрузивов. **Методы.** Используются комплексные структурно-геологические, металло-генические, геолого-петрологические, рудно-метасоматические, петрохимические параметры метасоматитов и результаты ранее проведенных научно-тематических, геолого-разведочных работ. Между петрохимическими параметрами метасоматитов и содержаниями меди и молибдена улавливается определенная закономерность. **Результаты.** Установлено, что в пределах Гошгарчайской РМС мощность зон метасоматически измененных пород составляет от нескольких метров до десятков, а иногда даже сотен метров (в узлах пересечения разноориентированных разрывов). Протяженность их измеряется от 500–1000 до 2000–3000 м. Вокруг рудогенерирующих интрузивов Гошгарчайской РМС выделяется три постепенно сменяющие друг друга в пространстве метасоматические зоны в виде эллипса, окаймляющие интрузивный массив порфирового сложения. Внутренняя зона, охватывающая эндоконтактовую и апикальную части порфирового интрузива, представлена интенсивно окварцованными, почти нацело преобразованными во вторичные кварциты породами. Средняя зона выделяется как кварц-серицит-хлоритовая фация вторичных кварцитов. Третья, внешняя зона метасоматической колонки представлена пропилитовой фацией вторичных кварцитов. **Выводы.** В пределах контуров Гошгарчайского месторождения исследована рудная зональность и получен следующий ряд зональности элементов по вертикали (снизу вверх): Mo→Cu→Co→Ni→Cr→Ag→Pb→Zn. На основании петрохимических данных исследованы и сопоставлены

^аМансуров Мамой Ибрагим, доцент кафедры геологии полезных ископаемых, тел.: +994506227175, e-mail: mamoy_mansurov@mail.ru

Mamoy I. Mansurov, Associate Professor of the Department of Minerals Geology, tel.: +994506227175, e-mail: mamoy_mansurov@mail.ru

^бСафари Мехти Гаджи, доцент кафедры геологии полезных ископаемых, тел.: +989122889600, e-mail: mb.safari@yahoo.com

Mehti H. Safari, Associate Professor of the Department of Minerals Geology, tel.: +989122889600, e-mail: mb.safari@yahoo.com

^сКаландаров Багадур Гасан, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, тел.: +994503428600.

Bahadur G. Kalandarov, Professor of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology, tel.: +994503428600.

^дКеримов Вагиф Мирза, доцент кафедры общей геологии, тел.: +994506151897, e-mail: vaqifkerimov68@mail.ru

Vaqif M. Kerimov, Associate Professor of the Department of General Geology, tel.: +994506151897, e-mail: vaqifkerimov68@mail.ru

^еМамедова Айгюн Галиб, преподаватель кафедры геохимии и минералогии, тел.: +994503716146, e-mail: aygun_mammadova_1971@yahoo.com

Aygun G. Mamedova, Lecturer of the Department of Geochemistry and Mineralogy, tel.: +994503716146, e-mail: aygun_mammadova_1971@yahoo.com

гидротемально-метасоматические изменения вмещающих пород в зонах различных типов метасоматитов, образованных в процессе формирования месторождения.

Ключевые слова: *Гошгарчайская рудно-магматическая система, интрузивные комплексы, медно-порфировые месторождения, метасоматическая колонка, рудно-метасоматическая зональность, рудные минералы, рудоносность.*

Информация о статье. Дата поступления 2 октября 2017 г.; дата принятия к печати 20 декабря 2017 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Мансуров М.И., Сафари М.Г., Каландаров Б.Г., Керимов В.М., Мамедова А.Г. Зональность оруденения и метасоматитов в медно-порфировых месторождениях Гошгарчайской рудно-магматической системы (Малый Кавказ, Азербайджан) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 38–53. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-38-53

MINERALIZATION AND METASOMATITES ZONING IN PORPHYRY COPPER DEPOSITS OF GOSHGARCHAI ORE MAGMATIC SYSTEM (LESSER CAUCASUS, AZERBAIJAN)

© M.I. Mansurov, M.H. Safari, B.G. Kalandarov,
V.M. Kerimov, A.G. Mamedova

Baku State University,
23 Z. Halilov St., Baku AZ1148, Republic of Azerbaijan
Payami Nur University,
Artesh St., Tegeran, P.O. 19395-3697, Republic of Iran
Azerbaijan State Oil Industrial University
20 Azadlyg Ave., Baku AZ1010, Republic of Azerbaijan

ABSTRACT. The Purpose of the paper is to analyze the zoning nature of mineralization and metasomatites in the known porphyry copper deposits of the Goshgarchai ore magmatic system (OMS) associated with the Murovdag group of intrusives. The **Methods** used in the study include complex structural and geological, metallogenetic, geological-petrological, ore metasomatic and petrochemical parameters of metasomatites as well as the studies that take into account science-based geological prospecting works carried out earlier. There is some regularity between the petrochemical parameters of metasomatites and the contents of copper and molybdenum. **Results.** It has been found that the thickness of metasomatically altered rocks varies from several meters to tens and hundreds of meters (in the intersections of multi-oriented faults) within the Goshgarchai OMS. Their length ranges from 500-1000 m to 2000-3000 m. Three gradually changing each other elliptical metasomatic zones are distinguished around the ore generating intrusives of the Goshgarchai OMS. They border the intrusive massif of porphyry composition. The inner zone including the endocontact and apical parts of the porphyry intrusive is represented by strongly silicified rocks, which are almost completely transformed into secondary quartzites. The middle zone is determined as quartz-sericite-chlorite facies of secondary quartzites. The third external zone of the metasomatic column is represented by the propylite facies of secondary quartzites. **Conclusions.** Having studied ore zoning within the borders of the Goshgarchai deposit we have obtained the following series of vertical zonality of elements (bottom-up): Mo→Cu→Co→Ni→Cr→Ag→Pb→Zn. Hydrothermal metasomatic variations of enclosing rocks in the zones of different types of metasomatites generated under deposit formation have been studied and compared on the basis of petrochemical data.

Keywords: *Goshgarchai ore magmatic system, intrusive complexes, porphyry copper deposits, metasomatic column, ore-metasomatic zonality, ore minerals, ore content*

Article info. Received 2 October 2017; accepted for publication 20 December 2017; available online 30 March 2018.

For citation. Mansurov M.I., Safari M.H., Kalandarov B.G., Kerimov V.M., Mamedova A.G. Mineralization and metasomatites zoning in porphyry copper deposits of Goshgarchai ore magmatic system (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *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, vol. 41, no. 1, pp. 38–53. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-38-53

Введение

Проблема прогнозирования, изучения и оценки медно-молибден-порфировых месторождений в вулканогенных поясах азербайджанской части Малого Кавказа – одна из наиболее актуальных для решения вопроса о расширении минерально-сырьевой базы не только меди и молибдена, но и золота и серебра, элементов платиновой группы, полиметаллов, редких и редкоземельных элементов. На Малом Кавказе широко распространены месторождения и рудопроявления меди во всех металлогенических зонах. Они относятся к трем генетическим типам, имеющим промышленное значение: медно-порфировым, медно-колчеданным и медно-полиметаллическим. Все они сопряжены с вулкано-интрузивными и плутоническими комплексами Малого Кавказа. Медно-порфировые проявления, связанные с плутоническими гранитоидными массивами Муровдагского рудного района, являются наиболее перспективными. Здесь же располагается несколько месторождений и рудопроявлений медно-порфирового типа, в которых ресурсы медных руд могут быть отнесены к разряду крупных месторождений. Наиболее изученным является Гошгарчайское месторождение, где проводились разведочные работы, что позволило выделить его как весьма перспективное.

Материалы и методы исследования

Гошгарчайская рудно-магматическая система (РМС), являясь составной частью Лок-Агдамской палеоостровной дуги, занимает СЗ приподнятую часть Муровдагского антиклинория асимметричного строения, сложенного породами нижнебайосской вулканогенной толщи в ядре и верхнебайосской и батской толщами базальт-андезит-риолитовой последовательно дифференцированной формации на крыльях.

Интрузивными составляющими РМС являются Гошгарчайский комплекс гранитоидных интрузий (Гошгардагская, Оджагдагская, Баладжа Гошгардагская) и их дайковые образования, которые прорывают мощный комплекс эффузивно-пирокластических образований, оказывая на них контактовое воздействие. Интрузивные комплексы с медно-порфировым оруденением по геолого-петрологическим особенностям принадлежат к габбро-диорит-гранодиоритовой формации позднеюрско-раннемелового возраста (рис. 1) [1–6].

В Гошгарчайской РМС медно-порфировое оруденение охватывает Гашгачайское, Гошгардагское, Гызылархачское, Кечалдагское, Ерик-Манукское и другие месторождения и рудопроявления, где оно находится в тесной пространственной и генетической связи с одноименными гранитоидными массивами. По геологическому положению и пространственному размещению интрузивные образования Муровдагской группы Р.Н. Абдуллаевым разделены на Гошгардагскую и Гызылархачскую группы [1].

Отметим, что интрузивы прорывают мощный комплекс эффузивно-пирокластических образований средней юры, на основе чего с достаточной степенью точности устанавливается их нижний возрастной предел. Из-за отсутствия прямых данных Р.Н. Абдуллаевым [1] верхняя возрастная граница интрузивов определяется косвенно на основании аналогии петрографического состава их с породами Дашкесан-Зурнабадского массива, где последние прорывают верхнеюрские эффузивно-пирокластические и карбонатные породы, а в районе с. Зурнабад перекрываются коньякскими отложениями с гальками гранитоидов в основании. Таким образом, верхняя граница интрузивов Муровдагской группы принимается Р.Н. Абдуллаевым [1] как послеверхнеюрская-коньякская.

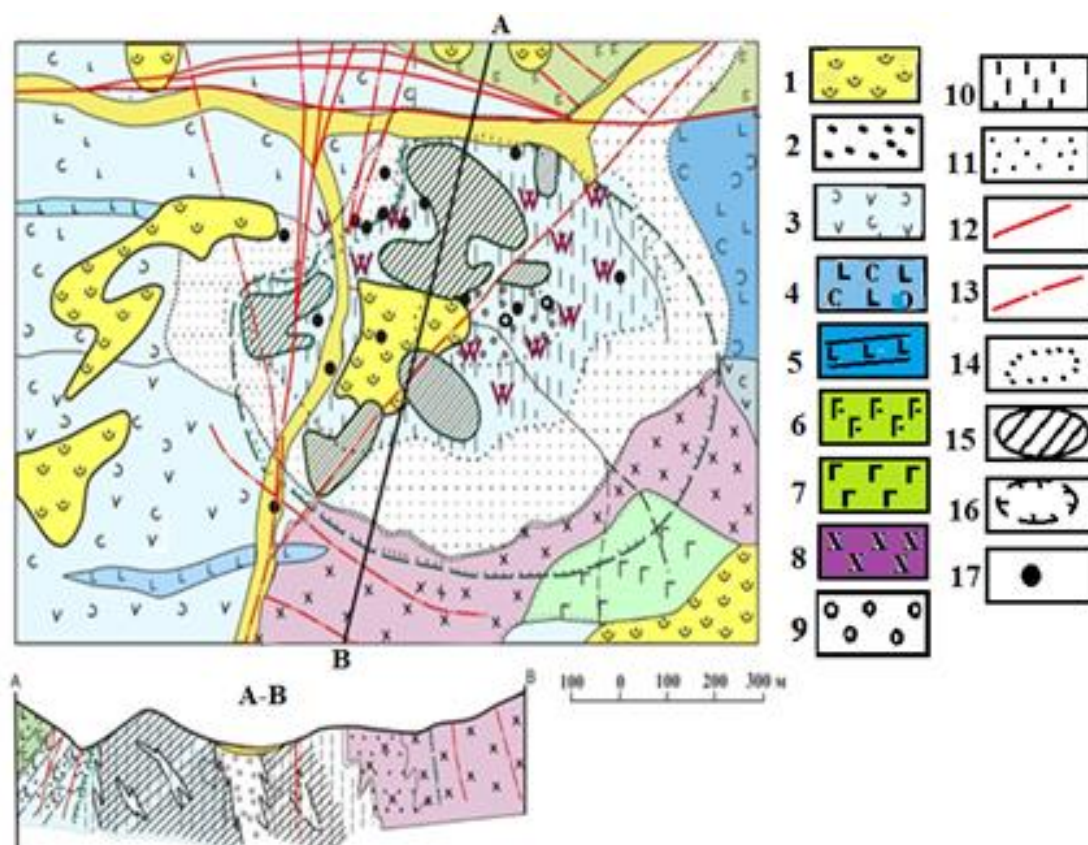


Рис. 1. Геологическая карта Гошгарчайского месторождения медно-порфировых руд (масштаб 1:10000):

- 1 – современные элювиально-делювиальные отложения; 2 – аллювиальные, пролювиальные отложения; 3 – андезиты и их туфы; 4 – диабазы и их туфы; 5 – дайки диабазовых порфиров; 6 – пластовые тела габбро, габбро-пироксенитов; 7 – габбро, габбро-диориты; 8 – диориты, кварцевые диориты; 9–11 – фации вторичных кварцитов: 9 – монокварцевая, 10 – кварц-серicitовая, 11 – пропилитовая (хлоритизированные, окварцованные, кальцитизированные, эпидотизированные и пиритизированные породы с жильково-вкрапленной рудной минерализацией); 12, 13 – разрывные нарушения: 12 – региональные рудоконтролирующие, 13 – прочие; 14 – границы фации вторичных кварцитов; 15 – контуры медно-порфировых рудных тел с промышленным содержанием на поверхности; 16 – ореолы распространения медно-порфировых руд; 17 – буровые скважины

Fig. 1. Geological map of the Goshgarchai deposit of porphyry copper ores (scale 1:10 000):

- 1 – recent residual and talus deposits; 2 – alluvial, proluvial deposits; 3 – andesites and their tuffs; 4 – diabases and their tuffs; 5 – dykes of diabase porphyrites; 6 – bedded bodies of gabbro and gabbro-pyroxenites; 7 – gabbro, gabbro-diorites; 8 – diorites, quartz diorites. 9–11 – facies of secondary quartzites: 9 – monoquartzite; 10 – quartz-sericite; 11 – propylite (chloritized, silicified, calcitised, epidotized and pyritized rocks with stringer-porphyry mineralization). 12, 13 – faults: 12 – regional ore control; 13 – other; 14 – borders of secondary quartzite facies; 15 – porphyry copper ore body outlines with pay ore on the surface; 16 – distribution halos of porphyry copper ores; 17 – bore holes

По мнению Э.Ш. Шихалибейли [7], Гошгардагская и Гызылархачская группы интрузивов находятся в осевой полосе Муровдагского антиклинория, где они прорывают байосские отложения. Известно, что стержневая часть Муровдагского хребта сформировалась после

бата и больше никогда не покрывалась морями, то есть в послебатское время она превратилась в сушу. Эти структуры нельзя ставить в один ряд с Журнабадом, который принадлежит Агджакендскому меловому прогибу.

В пределах Гошгарчайского месторождения интрузивные породы широко развиты и представлены габбро, габбро-диоритами, диоритами, кварцевыми диоритами и порфировидными гранодиоритами. Намечается три основные фазы верхнеюрско-нижнемеловой интрузивной серии: 1) диориты, кварцевые диориты, кварцевые диоритовые порфиры; 2) гранодиориты, гранодиорит-порфиры и гранит-порфиры; 3) дайки габбро-долеритов, диорит-порфиритов, кварц-диорит-порфиритов [1–3].

Гошгардагская группа интрузивов расположена на восточном и западном склонах г. Гошгардаг, на южном склоне г. Озаграг, а также на месте слияния рр. Баладжа и Бюк Гошгарчай. Она впервые выявлена Р.Н. Абдуллаевым и им же описана [1].

Структура РМС сформировалась в результате последовательной смены нескольких этапов деформаций, сопровождающихся образованием трещиноватости в интрузивном массиве, внедрением даек, перемещением блоков по тектоническим разрывным нарушениям и выполнением трещин различными минеральными ассоциациями. Непосредственно рудоподводящими являются субширотная или общекавказская ориентировка нарушений, а разрывы СВ простирания, опирающиеся Гошгарчайский разлом со стороны его висячего бока, являются рудолокализирующими структурами, что объясняется: 1) расположением рудных зон в лежащем боку; 2) одинаковым направлением падения рудных зон и разломов при более крутых углах последних; 3) локализацией рудных зон преимущественно в мелких системах трещин и нарушениях локального значения; 4) приуроченностью к главным разломам субвулканических тел и даек, зон интенсивных гидротермальных изменений пород и вкрапленной сульфидной минерализации [2, 4, 8–12].

Результаты исследования и их обсуждение

Изучение многих месторождений, особенно гидротермального происхождения, показывает, что проявление зональности минералов и химических элементов в рудных телах неразрывно связано с зональностью окорудных метасоматитов. Характерными в этом отношении являются медно-порфировые месторождения, в которых наиболее отчетливо проявляются горизонтальные и вертикальные составляющие зональности, как в размещениях рудогенных элементов, так и в различных формациях метасоматитов [2, 13].

В целом породы Гошгарчайского интрузива обладают многими общими чертами: гипабиссальными условиями образования; интенсивными гидротермальными изменениями; одинаковым минеральным составом пород; сходной последовательностью кристаллизации минералов во всех группах пород [1–3].

Образование многофазной интрузии и связанного с ней оруденения Гошгарчайской РМС происходило длительное время. Метасоматическая зональность Гошгарчайской РМС свидетельствует о соответствии модели типичного объекта медно-порфировой рудной формации. Как и на многих месторождениях этого типа, внешняя зона измененных пород представлена пропилитами, промежуточная – кварц-серицитовыми метасоматитами и аргиллизитами, а внутренняя – существенно кварцевыми метасоматитами [2, 14].

В процессе становления Гошгарчайского массива отделение металлоносных флюидов было неоднократным, что и привело к формированию вначале связанной с ранней фазой обширной зоны пропилитизации, а затем – наложенных зон калиевого, кварц-серицитового и кварцевого метасоматоза и аргиллизации, обусловленных воздействием более кислых по составу поздних фаз.

Образование большей части промышленного медно-молибден-порфирового оруденения произошло вслед за внедрением порфиров ранней генерации. С поздней фазой порфиров связано переотложение ранее образовавшихся руд и формирование богатых скоплений в виде прожилково-вкрапленных штокверковых руд, ориентированных в широтном направлении в трещинной зоне Гошгарчайского разлома. Поздняя фаза порфиров была рудоносной в гораздо меньшей степени, чем первая. Она сопровождалась интенсивным окварцеванием, что и привело к образованию в центральной части месторождения «кварцевого ядра». К северу от него развита кварц-серицитовая зона с богатыми медно-молибден-порфировыми рудами, затем следует пропилитовая с преимущественно прожилковой пиритовой минерализацией [2, 4, 11, 14, 15].

Зональность оруденения в медно-порфировых месторождениях изучались многими исследователями [12, 16–20]. И.Г. Павлова и другие [12] приводят следующий ряд рудной зональности для медно-порфировых месторождений по максимуму концентраций элементов: железо → молибден → медь (молибден) → медь (золото) → железо (золото) → свинец → цинк (I); рудных минералов: магнетит-молибденит-халькопирит (с золотом) – пирит (с золотом) – сфалерит-галенит-энаргит-борнит-блеклая руда (II); парагенезисов минералов: калишат-магнетитовый, калишпат-биотит-магнетитовый, пирит-серицит-кварцевый; кварц-молибденитовый или калишпат-молибденитовый; кварц-халькопирит-молибденитовый; карбонат-галенит-сфалеритовый (III) (от центра к периферии и снизу вверх по восстанию рудных тел) [2, 8].

Из основных характеристик для построения моделей медно-порфировых месторождений типичным является набор зональных метасоматических из-

менений, имеющих непосредственную корреляцию с участками, богатыми рудой. Наиболее яркие примеры: калиевые, кварц-серицитовые вторичные изменения, расширенная аргиллизация и пропилитизация [15]. Обычно гипогенные аргиллитовые изменения образуются относительно поздно в процессе образования порфировой системы, но могут быть и более ранними [21]. Некоторые исследователи доказывают, что разница между набором метасоматитов не связана с отличиями в самих порфировых системах [22, 23]. Вероятно, это встречается просто потому, что некоторые зоны вторичных изменений, образованные на малых глубинах, во многих случаях были эродированы. В результате расширенные аргиллитовые изменения зачастую не включают в классические модели зональности метасоматических изменений. Детальными исследованиями порфировых месторождений было установлено, что ранние калиево-силикатные вторичные изменения (калиевый полевой шпат ± биотит ± магнетит с кварцевыми жилами) порфировых систем образованы в условиях высоких температур (400–600 °C), при участии сильно минерализованных флюидов магматического происхождения. А уже представляющие следующий этап более поздние серицитовые жилы ассоциируют с более холодными и менее минерализованными водами [23–25].

В пределах Гошгарчайской РМС мощность зон метасоматически измененных пород составляет от нескольких метров до десятков, а иногда даже сотен метров (в узлах пересечения разноориентированных разрывов). Протяженность их измеряется от 500–1000 до 2000–3000 м. Вокруг рудогенерирующих интрузивов выделяется три постепенно сменяющие друг друга в пространстве метасоматические зоны в виде эллипса, окаймляющие интрузивный массив порфирового сложения [2, 4, 5].

В участках, менее подверженных кварц-серицитовым вторичным изменениям, первичные темноцветные минералы, такие как роговая обманка, замещены биотитами, сульфидами и магнетитами. В дальнейшем это уже вторичные минералы. В зоне кварц-серицитовых изменений фенокристаллы плагиоклаза частично замещаются серицитом, а темноцветные минералы замещены кварцем и серицитом. Контакт кварц-сульфидных прожилков с метасоматитами мощностью 0,5 м заполнен серицитом и глинистыми минералами. Также серицит заполняет межзерновое пространство между кристаллами в прожилке.

Гидротемально-метасоматические изменения, как было отмечено выше, развиты вдоль разрывных нарушений по контактам интрузивных пород, зальбандам даек и жил. Исходными породами, преобразованными в метасоматиты, являются как интрузивные, так и вмещающие их вулканогенные образования. В зависимости от их тектонической подготовленности, механических свойств и химического состава интенсивность изменения не везде одинакова.

В строении метасоматической колонки Гошгарчайской РМС выделяется три зоны гидротермалитов, расположенные вокруг рудоносного кварц-диорит-порфирового штока, прорывающего жерловые и прижерловые фации байосских вулканитов среднеосновного состава [2, 4, 5, 9].

Внутренняя зона, охватывающая эндоконтактовую и апикальную части порфирового интрузива, представлена интенсивно окварцованными, почти нацело преобразованными во вторичные кварциты породами. Кварцевое ядро, обычно характерное для многих порфировых интрузивов с медно-порфировой минерализацией, на данном месторождении не отмечается, и можно лишь предполагать его наличие в централь-

ной, не вскрытой эрозией части интрузива. Внутренняя зона представлена вторичными кварцитами светло-серого цвета с многочисленными прожилками кварца поздних генераций. Судя по минеральному составу, данная зона соответствует кварц-серицитовой фации вторичных кварцитов.

Рудоносность зон кварц-серицитовых метасоматитов обычно слабая. Причиной этого является редкая вкрапленность сульфидов, преимущественно халькопирита. Однако с глубиной содержание сульфидов постепенно увеличивается, поэтому содержание меди увеличивается от 0,01 % на поверхности до 0,05 % на глубине. Параллельно в минеральном составе зоны появляются кальцит и хлорит, увеличивается содержание серицита. Далее с глубиной в связи со значительным увеличением содержания хлорита в составе пород осуществляется переход к кварц-серицит-хлоритовой фации вторичных кварцитов, где также увеличивается содержание меди, которое уже достигает 0,15 %. Данный факт говорит также о наличии вертикальной зональности в строении метасоматической колонки.

Средняя зона выделяется как кварц-серицит-хлоритовая фация вторичных кварцитов. Минеральный состав метасоматитов представлен кварцем, хлоритом, серицитом, эпидотом, кальцитом и пиритом, причем первые три составляют основную массу пород. Зона занимает значительную площадь длиной 1,2 км при ширине 400–600 м. На эту фацию отчетливо накладывается медно-порфировая минерализация прожилково-вкрапленного типа. Наиболее интенсивное ее развитие характерно именно для кварц-серицит-хлоритовой фации вторичных кварцитов, фиксирующих зоны повышенной трещиноватости. С глубиной количество кварца и серицита пропорционально уменьшается, в то же время увеличивается распространен-

ность хлорит-эпидот-кальцитовой ассоциации.

Третья, внешняя зона метасоматической колонки представлена пропилитовой фацией вторичных кварцитов. Здесь пропилитизация имеет площадное распространение, однако внешние ее границы определить сложно, так как количество новообразований в зоне слабых изменений представлено хлоритом, эпидотом, цоизитом, альбитом, серицитом, биотитом, реже актинолитом а также пиритом. В этой зоне, которая венчает метасоматическую колонку, изредка выделяются незначительные рудные интервалы, чаще жильного типа, характеризующиеся повышенным содержанием меди. В рудных прожилках установлено относительно высокое содержание серебра, а также наличие сфалеритовой минерализации [2]. Зоны наиболее сильного преобразования пород располагаются вдоль путей циркуляции растворов, какими являются разрывные нарушения всех направлений, контакты пород, участков гранитизации близ рудных тел и минерализованных зон. Судя по минеральным ассоциациям, пропилитизация протекала в гипабиссальных условиях. Наличие в пропилитизированных породах биотита и альбита указывает на повышенную щелочность гидротермальных растворов [4, 11, 12]. Пропилитизация сопровождается образованием ряда четко разграниченных зон качественно различного состава в зависимости от литологического состава исходной породы. Процесс протекает по принципу инфильтрационного метасоматоза в условиях температурного градиента, характерного для процессов приконтактового выщелачивания [17, 26].

В пределах Гошгарчайской РМС отмечается: 1) четкая пространственная связь с порфировыми интрузиями гранитодного состава; 2) смена зон метасоматитов: биотит-калишпатовая – кварц-

серицитовая – пропилитовая; 3) прожилково-вкрапленный характер минерализации.

Среди пропилитов выделяется две фации: актинолит-эпидотовая и хлорит-эпидотовая. Пропилитизированные породы актинолит-эпидотовой фации отмечаются в среднем на 0,4–0,8 м от подводящего канала, пропилитизированные породы и пропилиты хлорит-эпидотовой фации развиваются от него в среднем на расстоянии в 0,1–0,5 м. Во внутренних зонах метасоматических колонок в тектонических нарушениях и рудных зонах встречаются брекчии хлорит-эпидот-кварцевого состава.

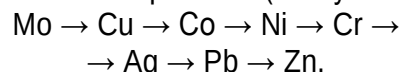
В пропилитизированных габброидах хлорит-эпидотовой фации отмечается значительное количество метасоматических зон. В пропилитах эпидот-хлоритовой фации нет актинолита, число вторичных минералов по направлению к жиле уменьшается, происходит частичное или полное замещение альбита и эпидота карбонатом, серицитом, хлоритом, которые отмечаются во всех зонах метасоматической колонки. В рудных зонах и тектонических нарушениях устойчива ассоциация эпидот-кварц-пирит, в контактах с рудными жилами – серицит-кварц-пирит. На удалении от жилы отмечаются пропилиты состава: хлорит, альбит, карбонат, кварц, серицит, есть вкрапленность сульфидов, отмечены различные прожилки, как собственные пропилитизированным породам с эпидотом и кварцем, так и синрудные кварц-карбонатные с сульфидами. Иногда в рудных зонах и тектонических нарушениях отмечаются хлорит-эпидот-кварцевые брекчии, встречаются прожилки эпидот-кварцевого, кварцевого состава [2, 5, 6, 10, 11, 13, 14].

На петролого-геохимическом разрезе площади Гошгарчай (рис. 2) видно, что между петрохимическими параметрами метасоматитов и содержаниями меди и молибдена улавливается опре-

деленная зависимость. Она заключается в том, что максимальное содержание меди и молибдена приурочено к вторичным кварцитам кварц-каолиновой и кварц-серицитовой фаций в экзо- и эндоконтактах соответственно. Если в экзоконтактах аргиллитность (*al*) увеличивается, а в эндоконтактах – уменьшается, то фемичность (*f*), наоборот, уменьшается и заметно увеличивается в отношении свежих гранодиоритов [2].

По данным буровых скважин, пройденных на Гошгарчайском месторождении, нами исследована рудная зональность в пределах ее контуров и

получен следующий ряд зональности элементов по вертикали (снизу вверх).



Расположение элементов по горизонтальным сечениям исходя из величин показателя зональности показано на рис. 3. Как видно из рисунка, в первом горизонте, где развиты кварц-серицит-каолиновые метасоматиты, расположены Zn, Pb, Ag и Cr; Ni и Co соответствуют третьему горизонту. Медь достигает своего максимального значения в четвертом, а молибден – в шестом горизонте.

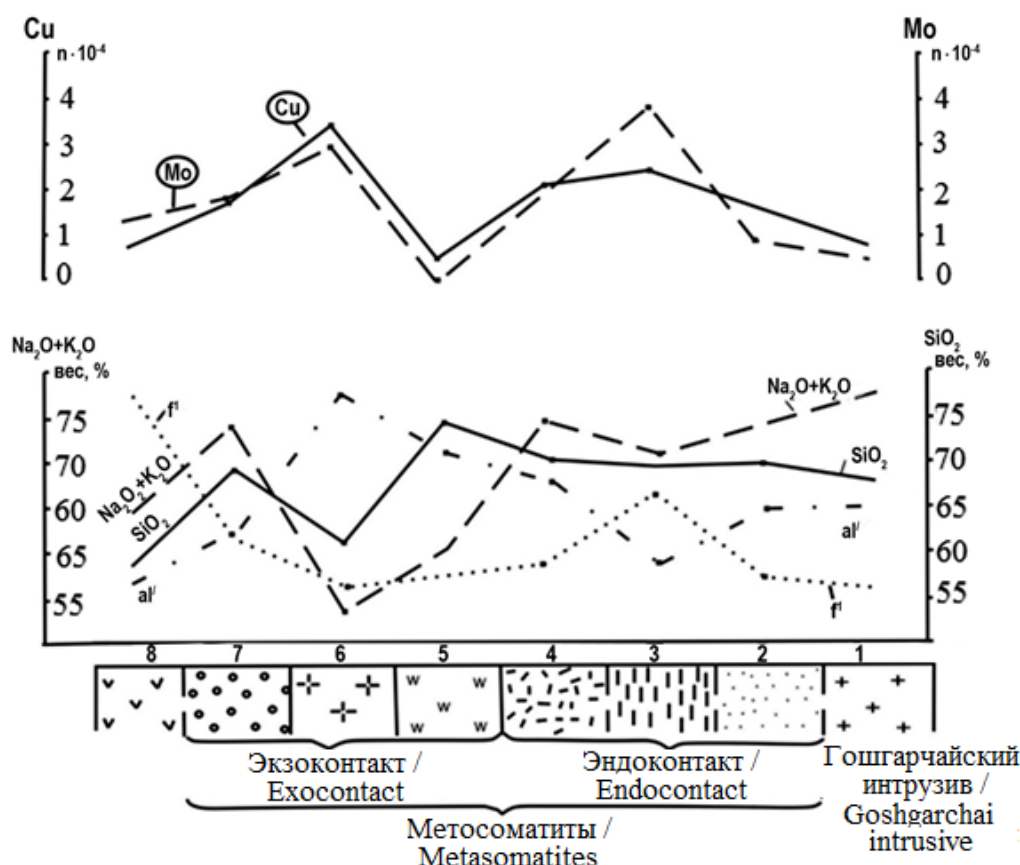


Рис. 2. Петролого-геохимический разрез площади Гошгарчай:

- 1 – гранодиориты, не затронутые изменениями; 2–7 метасоматиты: 2, 7 – пропилиты, 3, 5, 6 – вторичные кварциты (3 – кварц-серицитовые, 5 – монокварцевые, 6 – кварц-каолиновые); 4 – аргиллизиты; 8 – андезитовые туфы, не затронутые изменениями

Fig. 2. Petrological and geochemical section of the Goshgarchai area:

- 1 – unaffected granodiorites; 2–7 – metasomatites: 2, 7 – propylites, 3, 5, 6 – secondary quartzites (3 – quartz-sericite, 5 – monoquartzite, 6 – quartz-kaolinite); 4 – argillizites; 8 – unaffected andesite tuffs

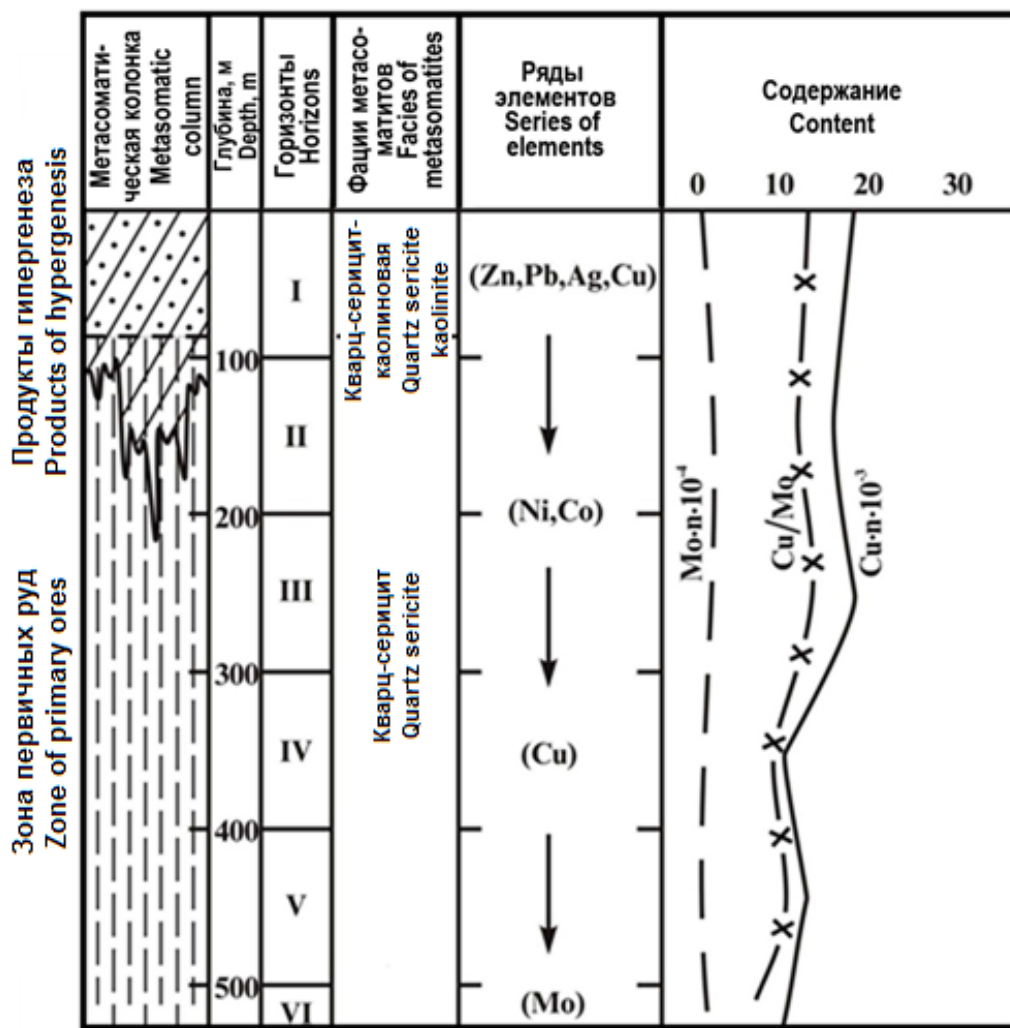


Рис. 3. Рудная зональность в вертикальном сечении (Гошгарчайское месторождение)
Fig. 3. Ore zoning in the vertical section (Goshgarchai deposit)

На основе анализа пространственного размещения гидротермалитов можно наблюдать эволюцию в их формировании, а именно: образование регионального пропилитового зеленокаменного изменения пород, имеющего широкое площадное распространение, наложение на них более поздних процессов, приводящих к образованию новых дорудных изменений. Эти изменения отличаются от ранней региональной пропилитизации значительно меньшим масштабом и четкой приуроченностью к разрывным нарушениям [27]. Рудная минерализация формируется именно в этом отрезке гидротермальной деятель-

ности, что привело к появлению полифациальных вторичных кварцитов, в том числе основных рудофокусирующих кварц-серицитовых метасоматитов. В общем случае эволюция гидротермального изменения пород привела к зональному строению метасоматитов.

В результате обработки множества признаков начали появляться сложные геологические модели порфировых систем. Одна из наиболее удачных принадлежит R.H. Sillitoe [19], им также определяется место медно-порфировых месторождений в ряду других месторождений (рис. 4).

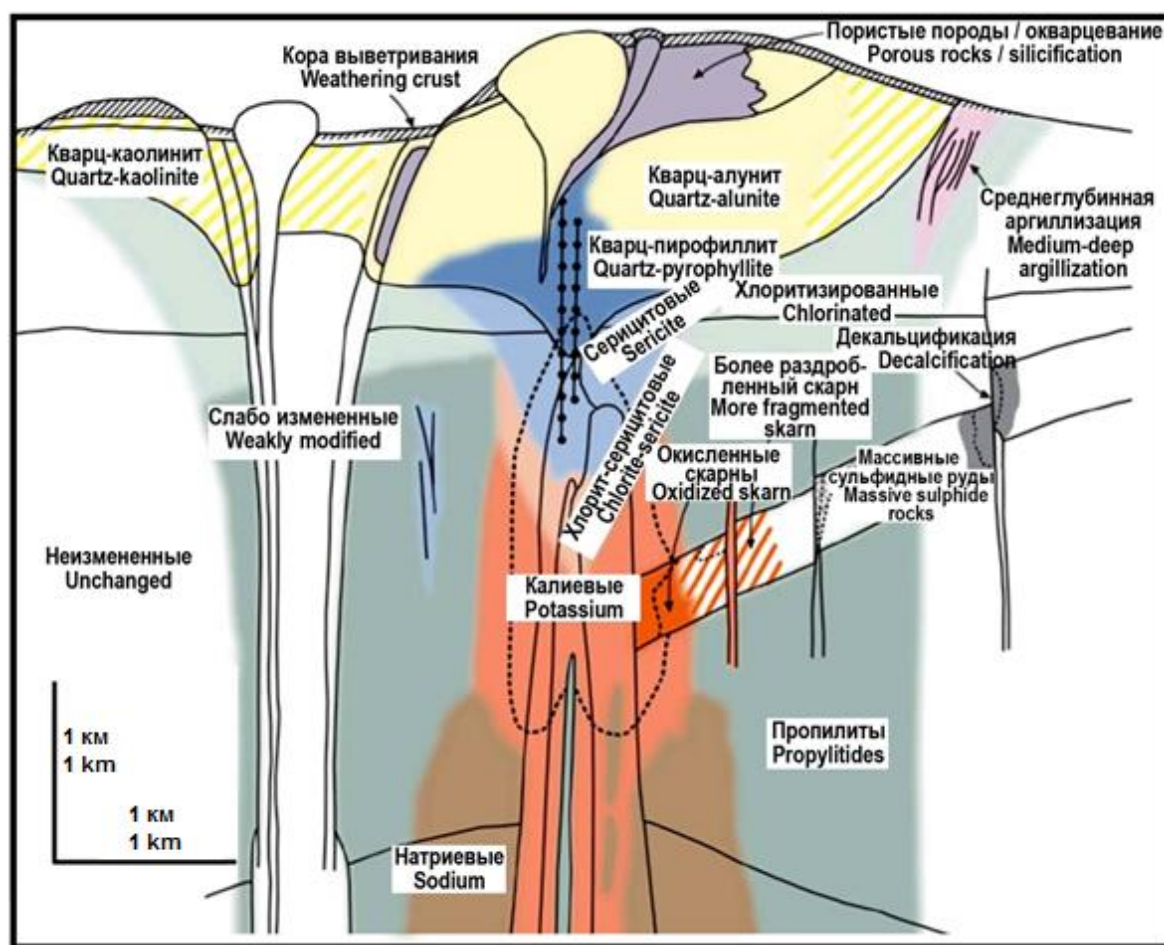


Рис. 4. Модель вторичных метасоматических изменений на разрезе идеализированной медно-порфировой системы (по R.H. Sillitoe [19])
Fig. 4. Model of secondary metasomatic alterations on the section of the idealized porphyry copper system (according to R.H. Sillitoe [19])

Выводы

Приведенная выше рудно-метасоматическая характеристика медно-порфировых месторождений Гошгарчайской РМС позволяет сделать следующие выводы:

1. Гошгарчайский РМС представляет собой перспективную площадь на медно-порфировые, а также золоторудные и полиметаллические руды. Интрузивные комплексы с медно-порфировым оруденением по геолого-петрологическим особенностям принадлежат к габбро-диорит-гранодиоритовой формации позднеюрско-раннемелового возраста. Характерными элементами интрузивов являются Cu, Mo, Pb, Zn, Au, Ag.

2. В процессе становления Гошгарчайского массива отделение металлоносных флюидов было неоднократным, что и привело к формированию вначале связанной с ранней фазой обширной зоны пропилитизации, а затем наложенных зон калиевого, кварц-серицитового и кварцевого метасоматоза и аргиллизации, обусловленных воздействием более кислых по составу поздних фаз.

3. В строении метасоматической колонки Гошгарчайской РМС выделяется три зоны гидротермалитов, расположенные вокруг рудоносного кварц-диоритового порфирового штока, прорывающего жерловые и прижерловые фа-

ции байосских вулканитов средно-основного состава.

4. Метасоматические образования медно-порфировых месторождений Гошгарчайского рудного поля представлены последовательно проявленными калишпатовой, грейзеновой, пропилитовой, вторично-кварцитовой и аргиллизитовой формациями, для которых характерно наложение продуктов последующих образований на более ранние.

5. Главными составляющими модели являются вмещающая рама (фа-

неритовые интрузивы), малые порфировые тела типа штоков и даек, (локализуемые, как правило, в зонах развития рудоконтролирующих структур и пространственно тесно увязывающиеся с оруденением), брекчиевые тела, рудные тела, рудно-метасоматическая зональность.

6. Основной объем промышленной минерализации контролируется как порфировым штоком, так и брекчиевыми телами, которые иногда несут значительный объем рудного вещества.

Библиографический список

1. Абдуллаев Р.Н., Мустафаев Г.В., Мустафаев М.А. [и др.]. Мезозойские магматические формации Малого Кавказа и связанное с ними эндогенное оруденение. Баку: Элм, 1988. 160 с.

2. Баба-заде В.М., Махмудов А.И., Рамазанов В.Г. Медно- и молибден-порфировые месторождения. Баку: Азернешр, 1990. 377 с.

3. Исмаил-заде А.Д., Мустафаев Г.В., Рустамов М.И. Геология Азербайджана. Магматизм. Баку: Nafta-Press, 2001. Т. 32. 434 с.

4. Мансуров М.И. Модели Рудно-магматических систем медно-порфировых месторождений Гошгарчайского рудного поля (Малый Кавказ, Азербайджан) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 4 (47). С. 29–42.

5. Минерально-сырьевые ресурсы Азербайджана (условия формирования, закономерности размещения, научные основы прогнозирования) / под ред. В.М. Баба-заде. Баку: Озан, 2005. 808 с.

6. Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М: Наука, 1990. 181 с.

7. Шихалибейли Э.Ш. Некоторые проблемные вопросы геологического

строения и тектоники Азербайджана. Баку: Элм, 1996. 215 с.

8. Кривцов А.И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М.: Недра, 1983. 256 с.

9. Мансуров М.И. Геолого-генетическая модель Гошгарчайской рудно-магматической системы Муровдагского поднятия (Малый Кавказ, Азербайджан) // Известия Национальной академии наук Азербайджана. Науки о Земле. 2013. № 4. С. 16–22.

10. Мансуров М.И. Поисково-прогнозные критерии выявления перспективных участков и новых типов оруденения Муровдагского горст-поднятия // Вестник Бакинского Университета. Серия естественных наук. 2013. № 4. С. 107–118.

11. Монгуш А-Д.О., Лебедев В.И. Ак-Сугское медно-молибден-порфировое месторождение: вещественный состав пород и руд // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. № 1 (42). С. 22–29.

12. Павлова И.Г., Сахновский М.Л. Модели рудно-магматических систем молибденово-медных порфировых ме-

сторождений как основа их поисков и прогнозирования // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций / под. ред. А.А. Оболенского, В.И. Сотникова, В.Н. Шарапова. Новосибирск: Наука, 1988. С. 225–232.

13. Азадалиев Дж.А. Особенности месторождений медно-порфировых руд рудно-магматических систем Малого Кавказа // Рудно-магматические системы орогенных областей: материалы научной конференции, посвященной 90-летию И.Х. Хамрабаева. Ташкент, 2010. С. 304–308.

14. Рамазанов В.Г., Каландаров Б.Г., Хасаев А.И., Мансуров М.И., Мамедов З.И., Тахмазова Т.Г. Геолого-геофизические основы прогнозирования эндогенного оруденения (на примере медно-порфировых месторождений Малого Кавказа) // Горно-геологический журнал. 2009. № 1-2 (17-18). С. 6–11.

15. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper ore deposits // *Economic Geology*. 1970. Vol. 65. P. 373–408.

16. Берзина А.П., Добрецов Н.Л., Сотников В.Н. Эволюция медно-молибденовых рудно-магматических систем Центрально-Азиатского складчатого пояса // Доклады Российской академии наук. 1995. Т. 342. № 1. С. 73–75.

17. Сотников В.И., Берзина А.П., Калинин А.С. Обобщенная генетическая модель рудно-магматических систем медно-молибденовых рудных узлов // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций / под. ред. А.А. Оболенского, В.И. Сотникова, В.Н. Шарапова. Новосибирск: Наука, 1988. С. 232–240.

18. Sillitoe R.H. Granites and metal deposits // *Episodes*. 1996. Vol. 19. P. 126–133.

19. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems, Society of Economic Geologists, Inc. // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105.

P. 3–41.

20. Sillitoe R.H., Hart S.R. Lead-isotope signatures of porphyry copper deposits in oceanic and continental settings, Colombian Andes // *Geochemical et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2135–2142.

21. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications // Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada / R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke [et al.]. 1993. Special Paper 40. P. 465–478.

22. Williams T.J., Candela P.A., Piccoli, P.M. The partitioning of copper between silicate melts and two phase aqueous fluids: An experimental investigation at 1 kbar, 800 °C and 0.5 kbar, 850 °C // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. Vol. 121. P. 388–399.

23. Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits, Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology // Society of Economic Geology Short Course. Toronto, Canada, 24–25 October, 10/1998. P. 235–256.

24. Reynolds T.J., Beane R.E. Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit // *Economic Geology*. 1985. Vol. 80. P. 1328–1347.

25. Sheppard S.M.F., Nielsen R.L., Taylor H.P. Jr. Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits // *Economic Geology*. 1971. Vol. 66. P. 515–542.

26. Титли С.Р., Бин Р.Е. Медно-порфировые месторождения // Генезис рудных месторождений. Т. 1. М.: Мир, 1984. С. 245–333.

27. Омеляненко Б.И. Околорудные гидротермальные изменения пород. М.: Недра, 1978. 213 с.

References

1. Abdullaev R.N., Mustafaev G.V., Mustafaev M.A. *Mezozoiskie magmaticheskie formatsii Malogo Kavkaza i svyazannoe s nimi endogennoe orudnenie* [Mesozoic magmatic formations of the Lesser Caucasus and associated endogenous mineralization]. Baku: Elm Publ., 1988, 160 p. (In Russian).
2. Baba-zade V.M., Makhmudov A.I., Ramazanov V.G. *Medno- i molibden-porfirovye mestorozhdeniya* [Copper- and porphyry molybdenum deposits]. Baku: Azerneshr Publ., 1990, 377 p. (In Russian).
3. Ismail-zade A.D., Mustafaev G.V., Rustamov M.I. *Geologiya Azerbaidzhana. Magmatizm* [Geology of Azerbaijan. Magmatism]. Baku: Nafta-Press Publ., 2001, vol. 32, 434 p. (In Russian).
4. Mansurov M.I. Models of ore-magmatic systems of copper porphyry deposits of Goshgarchay ore field (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii 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. 4 (47), pp. 29–42. (In Russian).
5. Baba-zade V.M. *Mineral'no-syr'evye resursy Azerbaidzhana (usloviya formirovaniya, zakonomernosti razmeshcheniya, nauchnye osnovy prognozirovaniya)* [Azerbaijan mineral resources (formation conditions, location regularities, scientific bases of prediction)]. Baku: Ozan Publ., 2005, 808 p. (In Russian).
6. Reif F.G. *Rudoobrazuyushchii potentsial granitov i usloviya ego realizatsii* [Ore-forming potential of granites and its implementation conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1990, 181 p. (In Russian).
7. Shikhalibeili E.Sh. *Nekotorye problemnye voprosy geologicheskogo stroeniya i tektoniki Azerbaidzhana* [Some problematic issues of Azerbaijan geological structure and tectonics]. Baku: Elm Publ., 1996, 215 p. (In Russian).
8. Krivtsov A.I. *Geologicheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov medno-porfirovnykh mestorozhdenii* [Geological bases for porphyry copper deposits forecasting and prospecting]. Moscow: Nedra Publ., 1983, 256 p. (In Russian).
9. Mansurov M.I. Geological and genetic model of Goshgarchay ore-magmatic system of Murovdag uplift (the Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Azerbaidzhana. Nauki o Zemle* [Azerbaijan National Academy of Sciences Proceedings. Earth Sciences], 2013, no. 4, pp. 16–22. (In Russian).
10. Mansurov M.I. Search and forecast criteria for identifying prospects and new types of mineralization of Murovdag horst-uplift. *Vestnik Bakinskogo Universiteta. Seriya estestvennykh nauk* [Baku University News. Natural Science series], 2013, no. 4, pp. 107–118. (In Russian).
11. Mongush A.D.O., Lebedev V.I. Ak-Sug copper-molibdenum-porphyry deposit: mineral composition of rocks and ores. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii 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], 2013, no. 1 (42), pp. 22–29. (In Russian).
12. Pavlova I.G., Sakhnovskii M.L. Models of ore magmatic systems of porphyry copper molybdenum deposits as a base for their search and prediction. *Rudoobrazovanie i geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii* [Ore genesis and genetic models of endogenous ore formations]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988, pp. 225–232. (In Russian).

13. Azadaliev Dzh.A. Features of porphyry copper ores of ore magmatic system of the Lesser Caucasus. *Rudno-magmaticheskie sistemy orogennykh oblastei: materialy nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu I.Kh. Khamrabaeva* [Ore-magmatic systems of orogenic areas. Materials of the scientific conference dedicated to the 90th birth anniversary of I.Kh. Khamrabayev]. Tashkent, 2010, pp. 304–308. (In Russian).
14. Ramazanov V.G., Kalandarov B.G., Khasaev A.I., Mansurov M.I., Mamedov Z.I., Takhmazova T.G. Geological and geophysical bases for endogenous mineralization prediction (on example of copper-porphyry deposits of the Lesser Caucasus). *Gorno-geologicheskii zhurnal* [Mining magazine], 2009, no. 1-2 (17-18), pp. 6–11. (In Russian).
15. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper ore deposits. *Economic Geology*, 1970, vol. 65, pp. 373–408.
16. Berzina A.P., Dobretsov N.L., Sotnikov V.N. Evolution of copper molybdenum ore-magmatic systems of the Central Asian fold belt. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1995, vol. 342, no. 1, pp. 73–75. (In Russian).
17. Sotnikov V.I., Berzina A.P., Kalinin A.S. Generalized genetic model of ore magmatic systems of copper-molybdenum ore clusters. *Rudoobrazovanie i geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii* [Ore genesis and genetic models of endogenous ore formations]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988, pp. 232–240. (In Russian).
18. Sillitoe R.H. Granites and metal deposits. *Episodes*, 1996, vol. 19, pp. 126–133.
19. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems, Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–41.
20. Sillitoe R.H., Hart S.R. Lead-isotope signatures of porphyry copper deposits in oceanic and continental settings, Colombian Andes. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2135–2142.
21. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications. Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada / R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke, 1993, Special Paper 40, pp. 465–478.
22. Williams T.J., Candela P.A., Piccoli, P.M. The partitioning of copper between silicate melts and two phase aqueous fluids: An experimental investigation at 1 kbar, 800 °C and 0.5 kbar, 850 °C. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, vol. 121, pp. 388–399.
23. Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits, *Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology*. Society of Economic Geology Short Course. Toronto, Canada, 24–25 October, 10/1998, pp. 235–256.
24. Reynolds T.J., Beane R.E. Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 1985, vol. 80, pp. 1328–1347.
25. Sheppard S.M.F., Nielsen R.L., Taylor H.P. Jr. Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 1971, vol. 66, pp. 515–542.
26. Titli S.R., Bin R.E. *Porphyry copper deposits. Genezis rudnykh mestorozhdenii* [Genesis of ore deposits], vol. 1. Moscow: Mir Publ., 1984, pp. 245–333. (In Russian).
27. Omel'yanenko B.I. *Okolorudnye gidrotermal'nye izmeneniya porod* [Hydrothermal changes of wallrocks]. Moscow: Nedra Publ., 1978, 213 p. (In Russian).

Критерии авторства

Мансуров М.И., Сафари М.Г., Каландаров Б.Г., Керимов В.М., Мамедова А.Г. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Mansurov M.I., Safari M.H., Kalandarov B.G., Kerimov V.M., Mamedova A.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 551.72

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-54-65>

КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ ДОКЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СИБИРСКОЙ И КИТАЙСКОЙ ПЛАТФОРМ В СВЯЗИ С ПЕРСПЕКТИВАМИ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

© Л.А. Рапацкая^а, М.Е. Тонких^б, Н.Е. Егорова^с

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

РЕЗЮМЕ. Цель. Провести корреляцию разрезов докембрийских отложений Сибирской и Китайской платформ, сопоставить тектонические шкалы по возрасту заключительной складчатости докембрия, выделить геолого-структурные предпосылки нефтегазоносности рифеид (синиид) Сибирской и Северо-Китайской платформ. **Методы.** Сопоставление разновозрастных структурно-вещественных комплексов, образовавшихся в сходных геодинамических обстановках, корреляция классических опорных разрезов докембрия Сибирской платформы и ее южного обрамления и Северо-Китайской платформы. **Результаты.** Составлены шкалы структурно-вещественных комплексов докембрия Сибири и Китая. Выполнена корреляция, в основу которой положены региональные шкалы структурно-вещественных комплексов, то есть вещественное выражение региональных геологических систем Сибири и Китая, и тектонические шкалы по возрасту складчатости, также принятые в России и Китае. Отмечено, что резкое изменение в ориентировке рифейских структур с дорифейскими структурами на Азиатском континенте совпадает с движением Люляна, на территории Европы ему соответствует выборгское движение, в Сибири – раннерифейское движение, на американском континенте – движение Гудзон: 1800–1600 млн лет. Этот планетарный этап континентальных деструкций и является временем распада Сино-Сибирского пракоинтента на Сибирский и Северо-Китайский кратоны. Подробный анализ дорифейской эволюции Сино-Сибирского пракоинтента и геологической истории рифейских структур позволил выделить геолого-структурные предпосылки нефтегазоносности рифеид (синиид) Сибирской и Северо-Китайской платформ. **Выводы.** Корреляция докембрия Сибирской и Северо-Китайской платформ показывает аналогию состава структурно-вещественных комплексов, сопоставление тектонических шкал по возрасту заключительной складчатости позволяет делать вывод о промышленной нефтегазоносности рифейских и синиидных толщ на Сибирской и Китайской платформах.

Ключевые слова: рифеиды, синииды, нефтегазоносность, Сибирская платформа, Китайская платформа.

Информация о статье. Дата поступления 23 января 2018 г.; дата принятия к печати 9 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Егорова Н.Е. Корреляция разрезов докембрийских отложений Сибирской и Китайской платформ в связи с перспективами нефтегазоносности // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 54–65. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-54-65

^аРапацкая Лариса Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, e-mail: raplarisa@yandex.ru

Larisa A. Rapatskaya, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, e-mail: raplarisa@yandex.ru

^бТонких Марина Евгеньевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, e-mail: tonkikh_me@istu.edu.

Marina E. Tonkikh, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, e-mail: tonkikh_me@istu.edu

^сЕгорова Наталья Евгеньевна, старший преподаватель кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, e-mail: egorova_ne@istu.edu

Natalia E. Egorova, Senior Lecturer of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, e-mail: egorova_ne@istu.edu

CORRELATION OF THE PRECAMBRIAN SECTIONS OF THE SIBERIAN AND CHINESE PLATFORM DEPOSITS BY OIL AND GAS CONTENT PROSPECTS

© L.A. Rapatskaya, M.E. Tonkikh, N.E. Egorova

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

ABSTRACT. The **Purpose** of the study is to carry out the correlation of profiles of the Precambrian deposits of the Siberian and China platforms, to compare tectonic scales by the age of the Precambrian final folding, to distinguish geological and structural backgrounds of the oil-and-gas content of Siberian and North China platform Rifeide (siniede). The **Methods** used in the study include the comparison of the coeval structural and material complexes formed in similar geodynamic conditions, correlation of classical basic profiles of the Precambrian of the Siberian platform, its southern frame and the North China platform. **Results.** The scales of structural and material complexes of the Precambrian of Siberia and China are composed. The correlation is performed which is based on the regional scales of structural and material complexes, that is material expression of regional geological systems of Siberia and China, and age-wise tectonic scales, which are also accepted in Russia and China. It is noted that drastic change in the orientation of the Riphean structures with the Pre-Riphean structures on the Asian continent coincides with the Liu Liang movement, which corresponds to the Vyborg movement on the territory of Europe, to early Riphean movement in Siberia, to the Hudson movement in the American continent: 1800–1600 million years. This planetary stage of continental destructions is also the time of disintegration of the Sino-Siberian pracontinent into the Siberian and North China cratons. The detailed analysis of the Pre-Riphean evolution of Sino-Siberian pracontinent and the geological history of the Riphean structures has allowed to distinguish the geological-structural backgrounds of the oil-and-gas content of the Siberian and North China platform Rifeides (sineides). **Conclusions.** The correlation of the Precambrian of the Siberian and North China platforms shows the analogy of the structural-material complexes composition. The comparison of tectonic scales by the age of final folding allows to draw a conclusion on the industrial oil-and-gas content of the Riphean and Sinian formations on the Siberian and China platforms.

Keywords: the Riphean, the Sinian, oil-and-gas content, Siberian platform, China platform

Article info. Received 23 January 2018; accepted for publication 9 March 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Egorova N.E. Correlation of the Precambrian sections of the Siberian and Chinese platform deposits by oil and gas content prospects. *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. 54–65. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-54-65

Введение

Согласно современным представлениям, Сибирский и Северо-Китайский кратоны в неопротерозойское время входили в состав суперконтинента Родиния и составляли единый Сино-Сибирский праcontinent. В основе концепции единого Сино-Сибирского праcontinent лежат данные о сходстве состава архейских и нижнепротерозойских образований Сибирского, Северо-Китайского и Корейского кратонов, а также субмеридианальное простираание главных архейских структурных элемен-

тов южной окраины Сибирской платформы и Хингано-Буреинского массива – связующего звена между упомянутыми древними кратонами. Соответственно, предполагается наложенный характер Центрально-Азиатского складчатого пояса, разделяющего в современном структурном плане Азиатского континента Сибирскую и Северо-Китайскую платформы [1, 2].

Время распада суперконтинента разными авторами трактуется неоднозначно и охватывает период от 1 млрд до 650 млн лет, но все исследователи

признают, что в результате его раскола образовались отдельные сегменты и произошло раскрытие Палеоазиатского океана, то есть внутриконтинентальный рифтинг по мере своего развития привел к образованию обширного океанического бассейна. По краям континента образовались пассивные окраины, где происходило формирование мощных толщ осадков, сносимых с континента, и накопление массы органического вещества, которое впоследствии послужило источником генерации капельножидкой нефти.

Корреляция разрезов докембрия Сибирской и Северо-Китайской платформ

В современных структурах Азиатского континента Сибирский и Северо-Китайский докембрийские кратоны отделены друг от друга рифейско-фанерозойскими геологическими системами. В настоящее время у исследователей Азии нет сомнений в том, что некогда эти кратоны составляли единый континент. Однако вопрос времени существования этого континента и периода его распада, а также того, существовал ли в рифее новый Сино-Сибирский континент и, если существовал, когда он распался, остается открытым.

Корреляция докембрия Сибирской и Северо-Китайской платформ проводилась многократно при решении общетеоретических проблем, в том числе при реконструкции единого Сино-Сибирского пракоинтinenta и его эволюции, а также при региональном картировании той и другой территории, составлении геологических и тектонических карт Азиатского континента и его отдельных регионов российскими и китайскими геологами [3–9].

Вместе с тем продолжается планомерное накопление знаний по геологии Сибири и Китая, в том числе доизучение тектонотипов и опорных разрезов, уже известных в литературе, корреляция

тектонических шкал той и другой территорий, сравнительное изучение разновозрастных эталонных структурно-вещественных комплексов Сибирской и Северо-Китайской платформ и их складчатого обрамления. Тем не менее прямое сопоставление геологических карт Китая и России невозможно из-за несоответствия возрастных границ по всей стратиграфической шкале докембрия Китая и России и несоответствия продолжительности формирования одноименных подразделений, в том числе стратотипов и тектонотипов. Это же касается и структурных подразделений, выделяемых по возрасту заключительной складчатости, которые в той и другой стране трансформируются соответственно их тектонотипам. То же самое относится не только к местным, но и к международным общепринятым шкалам.

Для того чтобы провести более или менее корректное сопоставление разновозрастных структурно-вещественных комплексов, образовавшихся в сходных геодинамических обстановках, были использованы классические опорные разрезы докембрия Сибирской платформы и ее южного обрамления и докембрия Северо-Китайской платформы (рис. 1).

Схема (см. рис. 1) составлена по литературным данным. Для более достоверного сравнения российскими и китайскими геологами были проведены совместные полевые маршруты по разрезам архея-протерозоя юга Сибирской платформы и архея-палеозоя Северо-Китайской платформы (горные системы Тайханшань, Утайшань и системы Хуто).

Характеристика докембрия Сибирской платформы сделана по сводной работе [11] с добавлениями. В результате сопоставления разрезов со шкалой структурно-вещественных комплексов докембрия [12] составлена шкала структурно-вещественных комплексов докембрия Сибири. По результатам анализа разрезов региональных подразделений

Абсолютный возраст, млн. лет / Absolute age, million years	Структурно- вещественные комплексы Китая / Structural and material complexes of China	Тектонические шкалы по возрасту заключительной складчатости / Tectonic scales based on the final folding age			Структурно- вещественные комплексы Сибири / Structural and material complexes of Siberia	
		Китай / China	Международная шкала / International scale	Россия / Russia		
570 700 850	----- Синий РЄ ⁴ ₃ / Blue РЄ ⁴ ₃	Движение Динь Нинь / Ding Nin Movement	Гренвилевская складчатость (1100–800 млн лет) / Grenville folding (1100–800 mln years)	Байкальская складчатость (850–570 млн лет) / Baikal folding (850–570 mln years)	Юдомий РЄ ² ₃ / Udomiy РЄ ² ₃	
1000 1050	Чинь Бейко РЄ ³ ₃ / Chin Beuko РЄ ³ ₃					
	Ди Шань РЄ ² ₃ / Di Shan РЄ ² ₃					
1350 1400		Складчатость Люлян / Lulan Folding	Гудзонская складчатость (1800–1600 млн лет) / Hudsonian folding (1800–1600 mln years)	Выборгская складчатость (1800–1600 млн лет) / Vyborg folding (1800–1600 mln years)	Рифей Rf РЄ ¹ ₃ / Riphean, Rf РЄ ¹ ₃	Верхний Rf ₃ / Upper Rf ₃
1500 1650 1800	Чан Чень РЄ ¹ ₃ / Chan Chen РЄ ¹ ₃					Средний Rf ₂ / Middle Rf ₂
1900	Хуто РЄ ² ₂ / Huto РЄ ² ₂	Ульканый РЄ ² _{ul} / Ulcany РЄ ² _{ul}				
2000		Складчатость Утай / Utay Folding	Карельская складчатость (2100–1900 млн лет) / Karelian folding (2100–1900 mln years)		Удоканий РЄ ¹ ₂ ud / Udokany РЄ ¹ ₂ ud	
2050	Утай РЄ ¹ ₂ / Utai РЄ ¹ ₂					
2500		Складчатость Фупин / Phupin Folding	Кеноренская складчатость (2900–2500 млн лет) / Kenorian folding (2900–2500 mln years)	Алданская складчатость (3000–2600 млн лет) / Aldan folding (3000–2600 mln years)	Алданий РЄ ¹ ₁ / Aldany РЄ ¹ ₁	
2600 3000 3100	Фупин РЄ ¹ ₁ / Phupin РЄ ¹ ₁					
3500 4000						

Рис. 1. Схема корреляции структурно-вещественных комплексов докембрия Северо-Китайской и Сибирской платформ [10]

Fig. 1. Correlation diagram of structural and material complexes of the Precambrian of North China and Siberian platforms [10]

Северо-Китайской платформы авторами данной статьи составлена аналогичная шкала структурно-вещественных комплексов Китая. Таким образом, в основу корреляции положены региональные шкалы структурно-вещественных комплексов, то есть вещественное выражение региональных геологических систем Сибири и Китая, и тектонические шкалы по возрасту складчатости, принятые в России и Китае (см. рис. 1).

В первом приближении алданская (кеноренская) складчатость совпадает с движением Фупин, карельская – с движением Утай, Выборгская – с движением Люлян, Гренвилльская – с движением Чинь Бейко, начало Байкальской – с движением Динь Нинь.

Архейские отложения на Сибирской платформе, относимые к раннему докембрию, обнажаются в пределах Алдано-Станового и Анабарского щитов и в выступах фундамента платформы Восточных Саян и Байкальской горной области. В пределах Алданского мегаблока Алдано-Станового щита Д.С. Коржинский еще в 1936 г. выделил иенгскую, тимптонскую и джелтулинскую серии единого алданского комплекса и сопоставил его с археем Прибайкалья по составу, региональному прогрессивному метаморфизму в силикатной и карбонатной частях разрезов, предположительно регрессивной ветви метаморфизма на уровне амфиболитовой и гранулитовой фаций и метасоматическим преобразованиям пород этих фаций. Комплекс сложен в нижней части кварцитами, переслаивающимися с высокоглиноземистыми силлиманит- и кордирит-биотитовыми, гранат-биотитовыми, гиперстеновыми, пироксен-амфиболовыми гнейсами, кристаллическими сланцами и амфиболитами. На них с несогласием залегают гиперстеновые гнейсы и сланцы (чарнокиты), биотит-гиперстеновые и двупироксеновые гранат-содержащие гнейсы, диопсидовые сланцы и кальци-

фиры, переслаивающиеся с доломитово-кальцитовыми мраморами. Породы интенсивно дислоцированы, смяты в изоклинальные складки, мигматизированы. Выделяются региональные купольные структуры или «складчатые овалы», ядерные части которых сложены аляскитовыми гранитами. Контакты повсеместно конкордантные с переходами в складчатые мигматиты без реакционных взаимоотношений, что дает основание предполагать их синметаморфический генезис.

Ближний разрез стратифицированных отложений подробно описан Д.С. Коржинским в Прибайкалье. Характерно также наличие здесь аналогичных по составу аляскитовых гранитов и мигматитов с аляскитовой лейкосомой.

К верхнему архею на территории Сибири относят отложения грабенообразных прогибов (троги, палеоавлакогены), характерных для зеленокаменных поясов многих платформ, в том числе и Северо-Китайской. Но здесь они отличаются более линейными границами, определяемыми пограничными крутыми разломами, отделяющими жесткие блоки раннеархейской литосферы от позднеархейско-раннепротерозойских прогибов.

Отложения системы Фупин, отвечающие по возрасту алданскому комплексу, обнажаются в крупном выступе архейских глубокометаморфизованных пород в горных сооружениях Тайханшань. Они сложены докембрийскими структурно-вещественными комплексами, с несогласием перекрываются породами системы Утай, которые в современной китайской геологической литературе относят к раннему протерозою, позднему архею или к границе между ними.

Система Фупин сложена грубозернистыми пироксеновыми и амфиболовыми гнейсами, в которых наряду с полевыми шпатами и кварцем, роговой

обманкой и пироксеном часто присутствует биотит. Гнейсы перемежаются с амфиболитами, суммарная мощность которых всегда уступает мощности гнейсов.

Весьма сходны соотношения нижнепротерозойских комплексов удокания с археем Сибири и системы Утай с археем Китая. Они имеют трансгрессивные залегания с угловым несогласием или без него.

Возраст алданской складчатости и складчатости Фупин практически совпадают. Тем не менее в том и другом регионах нередко комплексы архея и нижнего протерозоя не расчленяют, относя к единому кристаллическому субстрату архейско-раннепротерозойского возраста, слагающему фундамент древних Сибирской и Северо-Китайской платформ.

Удоканский структурно-вещественный комплекс (удоканий) залегает несогласно на верхнеархейском троговом комплексе или непосредственно на архейском кристаллическом фундаменте, выполняя обширный Удоканский прогиб. Мощность удоканской серии в среднем около 8 км, максимальная мощность достигает 12 км. В.С. Федоровский стратиграфически сопоставляет ее с тонодско-бодайбинской серией байкальской горной области, а ее нижнюю часть – с тепторгинской серией Чуйско-Тонодской зоны.

Серия сложена кварцитами, глиноземистыми сланцами, выше которых залегают метапесчаники, метаконгломераты и метаалевролиты с прослоями железистых песчаников, нередко с метаморфизованными известняками и высокомагнезиальными доломитами в верхней части. Верхняя часть серии состоит из медистых песчаников, в том числе отмечается продуктивный горизонт с халькопирит-борнит-халькозиновой минерализацией мощностью до 300 м.

Аналог удокания – система Утай – имеет широкое распространение в Се-

верном Китае, залегая в прогибах на архейском основании. Мощность ее превышает 8 км. В ее основании залегают железистые кварциты и глиноземистые слюдястые сланцы, имеющие первично осадочное происхождение. В верхней части основания расположены метаконгломераты, аркозовые кварциты, хлоритовые сланцы с медистой халькопирит-борнитовой минерализацией, слагающие главный хребет Утайшаня.

Складчатость Утай, охватывающая структурно-вещественный комплекс Утай, не проявляется в вышележащем комплексе Хуто. По времени она сопоставляется с карельской складчатостью на территории древних платформ северного полушария, которая также активно деформировала удоканскую серию, но не проявлялась в вышележащем комплексе улькания.

На основании всего вышеописанного, а также на основании сходства разрезов комплекса Утай и удоканской серии они могут быть отнесены к карельскому структурно-вещественному комплексу международной тектонической шкалы.

Ульканский структурно-вещественный комплекс состоит из метаэффузивов (трахибазальты, трахиты, трахиандезиты), переслаивающихся с кварцитами. Средняя часть ульканской серии содержит карбонаты и кислые эффузивы, а в верхней части, между средними и основными по составу эффузивами, залегают конгломераты и красноцветные песчаники.

На территории Китая аналогом улькания служит серия Хуто, сложенная кварцито-аспидно-карбонатным комплексом. Карбонатная часть серии Хуто, выделяемая ранее как известняки Хуто, содержит карбонатные породы с высоким содержанием магния, что характерно и для ульканского комплекса Сибири.

Установлено симметричное строение не только палеозоид Центральной

Азии, но и расположенных в ее периферических зонах позднепротерозойских складчатых сооружений, включающих многочисленные выступы архейских тектонических комплексов. Кроме того, отчетливо проявлена рифейская переработка архейских структур в Становой и Внутренне-Монгольской зонах, в результате чего общее их простираие оказалось субширотным.

В периферических зонах складчатого пояса проявились активные тектонические движения позднекареельских фаз и выборгской складчатости, известной в Северном Китае как движения Люлян. На складчатых бордюрах ранних протерозоид как на юге Сибири, так и в Северном Китае несогласно залегают структурно-вещественные комплексы шельфового типа: дербинская кварцито-карбонатная серия юга Сибири, кварцито-аспидно-карбонатная серия Хуто Внутренней Монголии, маркирующие дорифейские этапы формирования складчатой коры этих зон (см. рис. 1).

Из вышесказанного следует, что резкое изменение в ориентировке рифейских структур с дорифейскими структурами на Азиатском континенте совпадает с движением Люлян, на территории Европы ему соответствует выборгское движение, в Сибири – раннерифейское движение, на американском континенте – движение Гудзон: 1800–1600 млн лет. Этот планетарный этап континентальных деструкций и является временем распада Сино-Сибирского пракоинтента на Сибирский и Северокитайский кратоны.

Геолого-структурные предпосылки нефтегазоносности рифеид (синиид) Сибирской и Северо-Китайской платформ

Достаточно подробный анализ дорифейской эволюции Сино-Сибирского пракоинтента и геологической истории рифейских структур обусловлен необходимостью рассмотрения геолого-

структурных предпосылок нефтегазоносности рифеид (синиид) Сибирской и Северо-Китайской платформ. Итак, согласно современным представлениям Сибирский и Северо-Китайский кратоны в неопротерозойское время составляли единый Сино-Сибирский пракоинтент и входили в состав суперконтинента Родиния. Время распада этого континента разными авторами трактуется неоднозначно и охватывает период от 1 млрд до 650 млн лет, но все исследователи признают, что в результате его раскола образовались отдельные сегменты и произошло раскрытие Палеоазиатского океана, то есть внутриконтинентальный рифтинг по мере своего развития привел к образованию обширного океанического бассейна.

После распада архей-раннепротерозойского континента на два кратона, Сибирский и Северо-Китайский, геологическая история его отдельных частей в значительной степени отличалась. Важнейшим событием в истории развития Сибирской платформы в раннерифейское время является раскрытие континентальных рифтов, положившее начало формированию рифейских осадочных бассейнов. На протяжении рифейского времени происходило постепенное расширение акватории морского бассейна, покрывающей значительную часть Сибирского кратона, где шло накопление мощных рифейских толщ.

Выходы рифея широко развиты на самой платформе (Алданская и Анабарская антеклизы) и в ее обрамлении (Прибайкалье, Предпатомский прогиб, Восточный Саян, Енисейский кряж и др. (рис. 2).

Отложения рифея с угловым несогласием залегают на денудированной поверхности архейско-нижнепротерозойского фундамента, сохранившей местами мощную кору выветривания, и перекрываются с несогласием терригенным комплексом венда (ушаковская

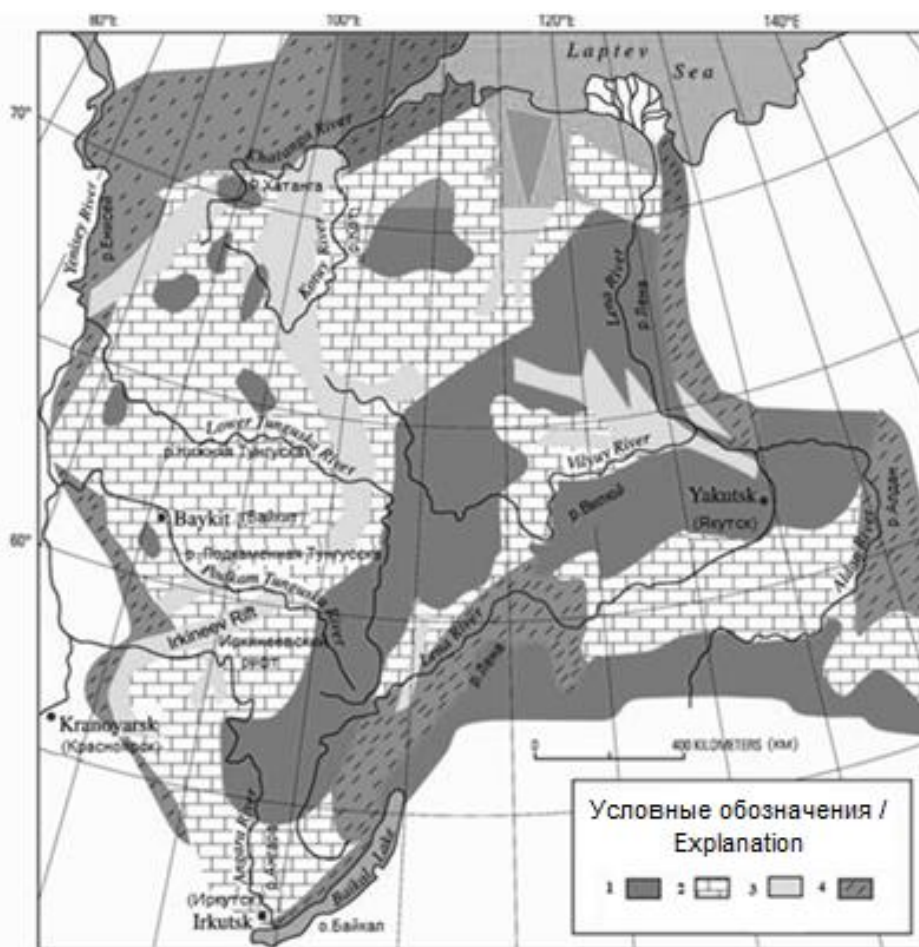


Рис. 2. Схема развития рифейских комплексов на Сибирской платформе (В.Г. Кузнецов, 1997):

- 1 – дорифейские кристаллические породы; 2 – отложения платформенного типа;
3 – внутриплатформенные рифты (авлакогены); 4 – отложения пассивных окраин

Fig. 2. Diagram of Riphean complexes development on the Siberian platform (V.G. Kuznetsov, 1997):

- 1 – Pre-Riphean crystalline rocks; 2 – platform type deposition;
3 – intra-platform rifts (aulacogenes); 4 – depositions of passive margins

и мотская свиты). Их аналоги на севере (Якутия) – юдомская, тетерская, собинская, юряхская, платоновская свиты. Возраст рифейских отложений – 1600 ± 100 – 600 ± 50 млн лет.

Известно, что самые масштабные месторождения углеводородов на Сибирской платформе приурочены к рифейским, рифейско-вендским и венд-кембрийским нефтегазоносным комплексам (Юрубчено-Тохомское, Куюмбинское, Верхнечонское, Чаяндинское, Талаканское нефтегазоносные месторождения и др.).

Кроме этого, промышленные притоки углеводородов из позднерифейских отложений различных стратиграфических уровней были получены в поисково-разведочных скважинах на склонах Алданской антеклизы и в Березовской впадине. На территории Байкинской антеклизы залежи углеводородов отмечены в отложениях добайкальского рифея, в пределах Иркинеево-Чадобецкого и Березовского авлакогенов притоки газа получены из отложений байкалия. Однако стратиграфическая привязка притоков нефти из отложений рифея на склонах

Алданской антеклизы остается весьма проблематичной [13].

Несколько иная палеогеографическая и литолого-фациальная обстановка складывалась на территории Северо-Китайского кратона, где воды Палеоазиатского океана отступали очень медленно с конца синия по неоген. Полностью морские воды регрессировали с Китайского континента в неогене, оставляя за собой множество озерных бассейнов, в которых шло накопление мощных толщ терригенных осадков с большой массой органического вещества [11]. Это нашло отражение и в особенностях нефтегазоносности китайских осадочных бассейнов, определяющихся тремя факторами:

1) обширным стратиграфическим диапазоном нефтегазоносности - от протерозоя (синия) до неогена;

2) преобладанием континентальных отложений в строении осадочных толщ;

3) разнообразием типов нефтегазоносных бассейнов, которые китайские исследователи по геотектоническим признакам разделяют на четыре группы:

– седиментационные бассейны на древних платформах: бассейны Ордос и Сычуань;

– бассейны на блоках, опущенных по разломам в фундаментах древних массивов: бассейны Цайдам и Тарим;

– бассейны на блоках, сформировавшиеся после консолидации геосинклинально-складчатых зон: бассейны Сунляо и Джунгария;

– палеоген-неогеновые бассейны в восточной части Китая, образовавшиеся благодаря растяжению и погружению по блокам под влиянием движения плиты Тихого океана: бассейны Южного Жёлтого моря, Восточного моря Джуцзянькио, Бейбу-вань, Хуабэй и др.

При преобладании в стратиграфических разрезах осадочных бассейнов терригенных коллекторов в Ордосском и Таримском бассейнах в синии – раннем

палеозое шло формирование морских осадков. В мезозое – кайнозое были распространены многочисленные небольшие по площади озерные бассейны, в которых преимущественно присутствовали континентальные фации с многообразием типов терригенных пород-коллекторов, большой мощностью отложений и богатством органики. Покрышки представлены в основном однородными глинами и редко – солями и гипсами. Именно в этих озерных бассейнах происходило накопление мощных осадочных толщ с большой массой органического вещества. В дальнейшем эти бассейны служили, по-видимому, палеоочагами генерации углеводородов.

Следует отметить, что во многих седиментационных бассейнах на территории Северо-Китайской платформы (а всего на территории Китая выделяют 236 бассейнов) присутствуют синийские нефтегазоносные отложения – аналоги сибирских рифеидов (не в полном объеме). Например, в крупнейшем нефтегазоносном бассейне – Таримском – нефтегазоносные горизонты выявлены почти во всех системах от синийской до четвертичной включительно. Они формируют два мощных нефтегазоносных комплекса.

В Северо-Китайском нефтегазоносном бассейне прослеживаются две крупнейшие рифтовые системы, в которых выделяется ряд впадин, состоящих из систем чередующихся грабенов и горстов с глубиной залегания фундамента от 4–6 до 9 км. Нефтегазоносны почти все стратиграфические подразделения разреза. Основными продуктивными горизонтами бассейна являются дельтовые и русловые песчаники миоцена, пласты флювиальных песчаников в озерных глинах палеогена, трещиноватые карбонаты синия – ордовика. Здесь выявлено более 95 месторождений нефти и газа, сконцентрированных в нескольких ареалах нефтегазонакопления:

зона Шенли, зона Паньшань (Ляохэ), зона Бошань, Цаньсяньский ареал зон и ряд более мелких зон [14].

Месторождение Шенли приурочено к сводовому поднятию Уди и занимает площадь в 26 тыс. км². Кроме своих масштабов оно примечательно еще тем, что с момента получения первого промышленного притока нефти в 1961 г. нефтегазоносные отложения были обнаружены почти во всех диапазонах стратиграфического разреза: от метаморфических пород архея до флювиогляциальных песчаников неогена.

На западном склоне Цансянского вала выявлено второе по запасам в бассейне (после Шенли) месторождение нефти Жэньцю (рис. 3) с залежью в эрозийном выступе, сложенном известняками и доломитами позднепротерозойского и раннепротерозойского возраста. Выступ ограничен сбросами и перекрыт палеогеновыми отложениями. Залежь нефти массивного типа, максимальная высота ее достигает 875 м, а глубина залегания – 2750–3500 м.

Бассейны Сычуань и Ордос лежат в Центральной части Китая. В этих бассейнах залежи также приурочены к нефтегазоносным горизонтам от синия до поздней юры.

Заключение

В геологической истории на фоне общей эволюции Палеоазиатского океана происходят неоднократные смены геодинамических режимов, этапов растяжения и сжатия, сопровождавшихся формированием разновозрастных островодужных систем и субдукционными окраинно-континентальными процессами и завершившихся аккрецией с наращиванием континентальной коры. Ведущей формой тектонического выражения процессов деструкции явились многочисленные и разнообразные структуры рифтогенной природы, развитие которых сопровождалось раскрытием коры океанического типа.

Наиболее выразительно процессы деструкции проявлялись в позднем протерозое – раннем палеозое, когда наряду с рифтогенезом по окраинам литосферных блоков (перикратонный рифтогенез) происходили крупноамплитудные раздвижки внутри континентов (инкратонный рифтогенез). В настоящее время рифтам и процессам рифтогенеза отводится важная роль в онтогенезе углеводородов, особенно при образовании осадочных бассейнов, которые формируются над рифтами после завершения фазы их активного расширения.

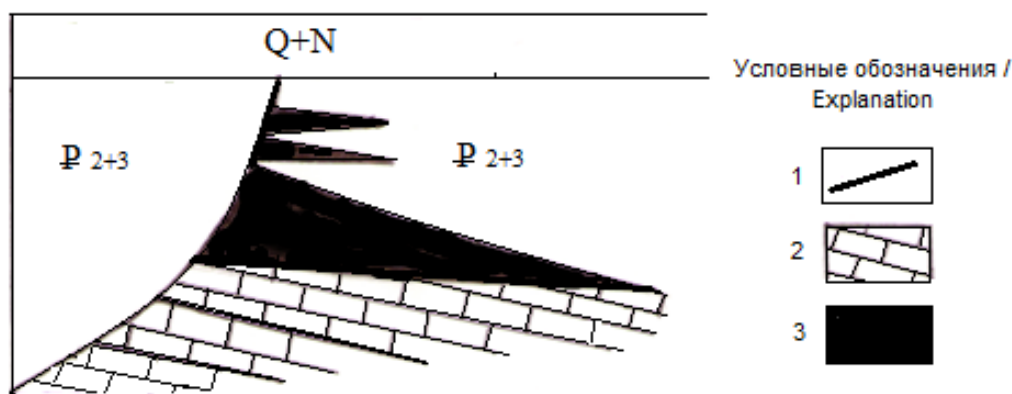


Рис. 3. Схематичный поперечный геологический разрез месторождения Жэньцю:

1 – сброс; 2 – известняки и доломиты верхнего протерозоя и нижнего палеозоя; 3 – нефтяные залежи [14]

Fig. 3. Schematic transverse geological section of the Renqiu field:

1 – fault; 2 – limestones and dolomites of the Upper Proterozoic and the Lower Paleozoic; 3 – oil deposits [14]

Корреляция докембрия Сибирской и Северо-Китайской платформ позволяет провести аналогию по составу структурно-вещественных комплексов, сопоставить тектонические шкалы по возрас-

ту заключительной складчатости и констатировать промышленную нефтегазоносность рифейских и синийских толщ на Сибирской и Северо-Китайской платформе соответственно.

Библиографический список

1. Зоненшайн Л.П. Тектоника внутриконтинентальных складчатых поясов: материалы XXVII Международного геологического конгресса. М., 1984. Т. 7. С. 48–59.

2. Зоненшайн Л.П. Кузьмин М.И., Моралев В.М. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. М.: Недра, 1993. 231 с.

3. Иванов А.Н., Алтухов Е.Н., Демин А.Н. Региональные геологические системы Центральной Азии. М.: Недра, 1993. 255 с.

4. Иванов А.Н., Рапацкая Л.А., Нью Шун. Эволюция докембрия Центральной Азии // Известия вузов Сибири. Серия наук о Земле. 1996. Вып. 1. С. 6–26.

5. Иванов А.Н. Региональные геологические системы. Проблемы типизации. Проблемы геологии Центральной Азии // Известия вузов Сибири. Серия наук о Земле. 1997. Вып. 2. С. 5–13.

6. Иванов А.Н., Рапацкая Л.А., Гэрэл О. Корреляция докембрия Центральной Азии // Известия вузов Сибири. Серия наук о Земле. 1999. Вып. 3. С. 175–176.

7. Лавров М.М. О нижней границе позднего докембрия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 1 (21). С. 9–13.

8. Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 343 с.

9. Gwang H. Lee, Booyong Kim, Kook Sun Shin, Don Sundao. Geologic evolution and aspect of the petroleum geology of the northern East China Sea shelf // AAPG Bulletin (American Association of Petroleum Geologist). 2006. Vol. 90. № 2. P. 237–260.

10. Иванов А.Н., Рапацкая Л.А. Дорифейская эволюция Сино-Сибирского проконтинента // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 6 (53). С. 22–26.

11. Милановский Е.Е. Геология СССР. В 3 ч. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1987. 413 с.

12. Косыгин Ю.А. Тектоника. М.: Недра, 1983. 536 с.

13. Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Соловьёва Л.В. Палеогеографические и палеогеодинамические условия формирования рифей-вендского осадочного бассейна юга Сибирской платформы в связи с его нефтегазоносностью // Геология нефти и газа. 2008. № 1. С. 8–15.

14. Высоцкий И.В. Нефтегазоносные бассейны зарубежных стран. М.: Недра, 1990. 405 с.

References

1. Zonenshain L.P. *Materialy XXVII Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa "Tektonika vnutrikontinental'nykh skladchatykh poyasov"* [Tectonics of intercontinental folded belts. Materials of the XXVII International Geological Congress].

Moscow, 1984. Vol. 7, pp. 48–59. (In Russian).

2. Zonenshain L.P. Kuz'min M.I., Moralev V.M. *Global'naya tektonika, magmatizm i metallogeniya* [Global tectonics, magmatism and metallogeny]. Moscow: Nedra Publ., 1993, 231 p. (In Russian).

3. Ivanov A.N., Altukhov E.N., Demin A.N. *Regional'nye geologicheskie sistemy Tsentral'noi Azii* [Regional geological systems of Central Asia]. Moscow: Nedra Publ., 1993, 255 p. (In Russian).

4. Ivanov A.N., Rapatskaya L.A., Nyu Shuin. Evolution of the Precambrian of Central Asia. *Izvestiya vuzov Sibiri. Seriya nauk o Zemle* [Proceedings of Siberian Higher Educational Institutions. Series: Earth Sciences], 1996, issue 1, pp. 6–26. (In Russian).

5. Ivanov A.N. Regional geological systems. Typification problems. Problems of Central Asia geology. *Izvestiya vuzov Sibiri. Seriya nauk o Zemle* [Proceedings of Siberian Higher Educational Institutions. Series: Earth Sciences], 1997, issue 2, pp. 5–13. (In Russian).

6. Ivanov A.N., Rapatskaya L.A., Gerel O. Correlation of the Precambrian of Central Asia. *Izvestiya vuzov Sibiri. Seriya nauk o Zemle* [Proceedings of Siberian Higher Educational Institutions. Series: Earth Sciences], 1999, iss. 3, pp. 175–176. (In Russian).

7. Lavrov M.M. On the lower boundary of the Late Precambrian. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2005, no. 1 (21), pp. 9–13. (In Russian).

8. Salop L.I. *Geologicheskoe razvitiye Zemli v dokembrii* [Geological development of the Earth in the Precambrian]. Lenin-

grad: Nedra Publ., 1982, 343 p. (In Russian).

9. Gwang H. Lee, Booyong Kim, Kook Sun Shin, Don Sundao. Geologic evolution and aspect of the petroleum geology of the northern East China Sea shelf. *AAPG Bulletin* (American Association of Petroleum Geologist), 2006, vol. 90, no. 2, pp. 237–260.

10. Ivanov A.N., Rapatskaya L.A. Pre-Riphean evolution of Sino-Siberian supercontinent // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 6 (53), pp. 22–26. (In Russian).

11. Milanovskii E.E. *Geologiya SSSR* [Geology of the USSR]. In 3 parts, part 1. Moscow: Moscow State University Publ., 1987, 413 p. (In Russian).

12. Kosygin Yu.A. *Tektonika* [Tectonics]. Moscow: Nedra Publ., 1983, 536 p. (In Russian).

13. Postnikova O.V., Fomicheva L.N., Solov'eva L.V. Paleogeographic and paleogeodynamic formation conditions of Riphean-Vendian sedimentary basin in the south of Siberian platform regarding its oil and gas presence. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and Gas Geology], 2008, no. 1, pp. 8–15. (In Russian).

14. Vysotskii I.V. *Neftegazonosnye basseiny zarubezhnykh stran* [Oil and gas bearing basins of foreign countries]. Moscow: Nedra Publ., 1990, 405 p. (In Russian).

Критерии авторства

Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Егорова Н.Е. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Egorova N.E. 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 549.02

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-66-78>

МИНЕРАЛОГИЯ ЩЕЛОЧНЫХ ПИКРОБАЗАЛЬТОВ ХРЕБТА ХЭНТЕЙ (ЮЖНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© В.В. Боролдоева^а, А.Я. Медведев^б

^{а,б}Институт Геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

РЕЗЮМЕ. Цель. На основе изучения минералогического и петрографического состава кайнозойских базальтоидов Хэнтэйского хребта определить порядок кристаллизации пород. **Методы.** Исследование осуществлялось при помощи микрозондового рентгеноспектрального анализа на приборе JXA-8200 (JEOL Ltd., Япония). **Результаты.** В ходе исследования в составе изучаемых пород были определены химические составы породообразующих минералов. В результате выполнения работы была установлена последовательность образования минералов. **Выводы.** При движении расплава к поверхности происходил захват мантийных ксенолитов. Вначале образовались оливин и пироксен первой генерации, далее – оливин и пироксен второй генерации, а также окиснородные минералы. Самыми последними из интерстиций кристаллизовались плагиоклаз, калиевый полевой шпат, нефелин и лейцит. Также в интерстициях отмечается остаточное стекло.

Ключевые слова: щелочные базальтоиды, внутриплитный магматизм, кайнозой, Южное Забайкалье.

Информация о статье. Дата поступления 4 октября 2017 г.; дата принятия к печати 13 декабря 2017 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Боролдоева В.В., Медведев А.Я. Минералогия щелочных пикробазальтов хребта Хэнтэй (Южное Забайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 66–78. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-66-78

MINERALOGY OF KHENTEI RIDGE ALKALINE PICROBASALTS (SOUTHERN TRANSBAIKALIA)

© V.V. Boroldoeva, A.Ya. Medvedev

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1a Favorsky St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The **purpose** of the paper is to determine the crystallization order of rocks based on the study of the mineralogical and petrographic composition of the Khentei Range Cenozoic basaltoids. **Methods.** A microprobe X-ray spectral analysis by means of the JXA-8200 tool (JEOL Ltd., Japan) has been used in the study. **Results.** The research results in the determination of chemical compositions of rock-forming minerals and the sequence of minerals formation. **Conclusions.** Melt movement to the surface was accompanied with the capturing of mantle xenoliths. Olivine and pyroxene of the first generation were formed first, then, olivine and pyroxene of the second generation were formed, as well as oxide bearing minerals. Plagioclase, potassium feldspar, nepheline and leucite were crystallized last from the interstices. The presence of residual glass has also been noticed in the interstices.

Keywords: alkaline basaltoids, intraplate magmatism, Cenozoic, Southern Transbaikalia

^аБоролдоева Виктория Валерьевна, аспирант лаборатории основного и ультраосновного магматизма, e-mail: viktoriaboroldoeva@yandex.ru

Viktoria V. Boroldoeva, Postgraduate student of the Laboratory of Basic and Ultrabasic Magmatism, e-mail: viktoriaboroldoeva@yandex.ru

^бМедведев Александр Яковлевич, главный научный сотрудник лаборатории основного и ультраосновного магматизма, e-mail: amedv@igc.irk.ru

Aleksandr Ya. Medvedev, Chief Researcher of the Laboratory of Basic and Ultrabasic Magmatism, e-mail: amedv@igc.irk.ru

Article info. Received 4 October 2017; accepted for publication 13 December 2017; available online 30 March 2018.

For citation. Boroldoeva V.V., Medvedev A.Ya. Mineralogy of Khentei ridge alkaline picrobasalts (Southern Transbaikalia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Seksii 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. 66–78. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-66-78

Введение

Щелочной вулканизм широко развит на юге Сибирской платформы [1, 2]. Самой крупной территорией проявления является Южно-Байкальская вулканическая область. Здесь выделено несколько этапов магматизма от позднеолигоценового (34–24 млн лет) до позднеплиоцен-плейстоцен-голоценового (< 3 млн лет) [3].

Другим районом распространения кайнозойских вулканитов является Южное Забайкалье. Нами изучены базальтоиды центральной части хребта Хэнтей, который расположен на территории Красночикойского района Забайкальского края. Исследуемые щелочные базальтоиды имеют возраст примерно 5,5–8 млн лет [4].

Первые сведения о них появились в работе Н.П. Костякова и др. (1969 г.) [5]. Они привлекли внимание из-за большого количества мантийных ксенолитов. Ранее также были изучены ксенолиты, в том числе и гранатовые [6]. Тем не менее вещественный состав базальтоидов практически не изучен. В данной работе приводятся первые данные по химическому составу минералов этих пород.

Материал и методы исследования

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Для аналитических исследований были выбраны фрагменты образцов без ксенолитов.

Составы минералов определялись микрозондовым рентгеноспектральным анализом (PCMA) на приборе JXA-8200 (JEOL Ltd., Япония). Условия анализа: ускоряющее напряжение прибора – 20

кВ, ток электронного зонда – 20 нА, диаметр зонда – 1 мкм, время измерения – 10 с. Используемые стандарты: Na – альбит; Mg – оливин CH-1; Al – пироп C-153; Si, Ca – голубой диопсид; K – ортоклаз; Ti – ильменит GF-55; Cr – хромит 79/62; Mn – Mn-гранат; Fe, Ni – NiFe₂O₄; Zn – ZnS; V – V₂O₅. В зональных минералах анализ проводился по профилю от края до края зерен через 15–25 мкм в центре и 10–15 мкм на краю. В гомогенных зернах анализировались по две-три точки на краю и в центре.

Краткая геологическая характеристика

Хэнтейский хребет занимает промежуточное положение между Витимским плато, базальтовым плато Южного Прибайкалья и вулканическими районами Монголии и плато Дариганга.

Кайнозойские щелочные вулканиды расположены в центральной части хребта Хэнтей, в верховьях рек Чикой, Чикокон и в среднем течении реки Буркал, правого притока Мензы (рис. 1).

Наибольшую распространенность изучаемые породы имеют в среднем течении реки Буркал и его правого притока Харчевки. Они залегают в виде протяженного (до 15 км) долинного потока, который расчленен на несколько полей площадью до 6–7 км². Реликты этого потока также наблюдаются на правом берегу Харчевки в ее среднем течении. Здесь они встречаются в виде небольших отдельных полей площадью не более 0,5 км² [5]. Вниз по долине вблизи ее устья на левобережье располагается наиболее крупное поле кайнозойских базальтоидов. Они перекрывают поверхность 100-метровой эрозионной

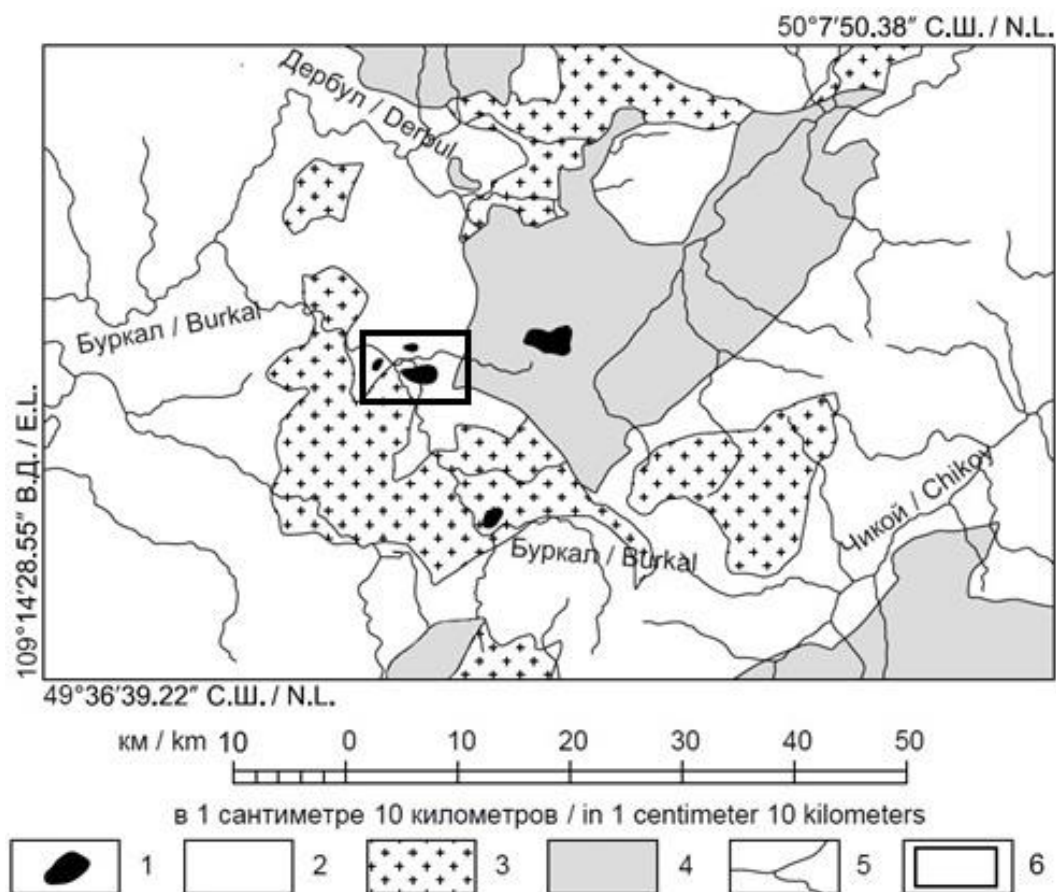


Рис. 1. Карта-схема расположения кайнозойских щелочных вулканитов:

1 – оливиновые базальты, трахибазальты (Q_{II}); 2 – Кыринский интрузивный гранит-гранодиоритовый комплекс (J_{1-2}); 3 – Даурский интрузивный гранодиоритовый комплекс (P_1); 4 – Ингодинская серия (песчаники, алевролиты, углисто-глинистые сланцы, яшмы, туфопесчаники); 5 – речная сеть; 6 – участок работ

Fig. 1. Map-layout of Cenozoic alkaline volcanite location:

1 – olivine basalts, trachybasalts (Q_{II}); 2 – Kyrinsky intrusive granite-granodiorite complex (J_{1-2}); 3 – Daurian intrusive granodiorite complex (P_1); 4 – The Ingoda series (sandstones, siltstones, carbonaceous shales, jasper, tuff sandstone); 5 – river network; 6 – work site

террасы и, возможно, сопутствующий ей долинный педимент.

В основании потока базальтов у устья Харчевки залегают черные и темно-серые чуть пористые базальты с редкими мелкими вкрапленниками зеленого и желтовато-зеленого оливина (Ol) размером до 2 мм. Характерна плитчатая отдельность. Мощность потока указанной разновидности базальтов – 20 м. Выше по разрезу наблюдаются черные чуть пористые базальты с многочисленными крупными (до 1 см) вкрапленниками зеленого оливина и реже пироксена (Px). Отмечаются овальные выделения

темного полупрозрачного вулканического стекла с зеленоватой тонкой оторочкой, обусловленной развитием щелочной роговой обманки. Мощность верхней части потока достигает 40 м [5].

Петрография и минералогия

По нашим данным, породы относятся к щелочным пикробазальтам [7]. Содержание SiO_2 меняется в пределах 41,39–42,70 мас. %, а MgO – 10,57–16,04 мас. %. Сумма щелочей превышает 5 мас. %. Исследуемые вулканиты имеют как порфировую, так и афировую структуру (рис. 2).

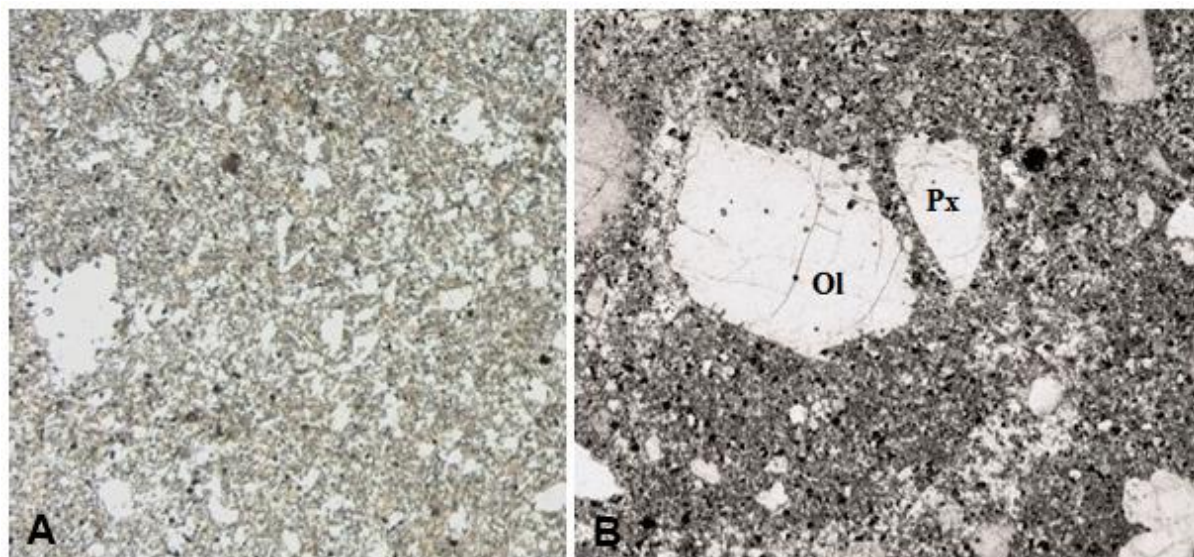


Рис. 2. Структура вулканитов:

A – афировая, B – порфировая; Ol – оливин, Px – пироксен

Fig. 2. Volcanite structure:

A – aphyric, B – porphyric; Ol – olivine, Px – pyroxene

В порфировых разновидностях пород присутствуют крупные зерна оливина (0,5–1,5 мм) и пироксена (1–1,5 мм), причем оливина значительно больше, чем пироксена, его количество составляет около 1,5 % от объема породы.

Структура основной массы интерсертальная. Основная масса сложена мелкими зернами оливина (менее 3 мм), пироксена (менее 0,1 мм), рудных минералов (0,04–0,05 мм) и тонкими лейстами плагиоклаза (0,15–0,20 мм). В интерстициях были обнаружены микролиты нефелина, лейцита, калиевого полевого шпата и остаточное стекло.

Оливины. Представительные данные анализа отображены в табл. 1. Оливин в исследуемых образцах обнаружен в двух разновидностях: крупные и мелкие зерна. Для всех зерен оливина наблюдается положительная корреляция Fo-NiO вес. % и отрицательная корреляция Fo-CaO вес. % (рис. 3).

Крупные зерна имеют зональность, которая выражена уменьшением форстеритовой составляющей от центра к краю. Здесь выделяются две разновидности, различающиеся по содержанию

форстерита в центре зерна – Ol₁ и Ol₂.

Ol₁ имеет максимальное содержание Fo, равное 91 моль. % (рис. 4), в центре зерна и соответствует оливинам перидотитовых ксенолитов. В центральных частях зерен Ol₁ содержание NiO достигает 0,43, а CaO – 0,10 мас. %. Это соответствует концентрациям данных элементов в мантийных перидотитах, следовательно, эти оливины являются ксенокристаллами.

Содержание форстеритовой составляющей в Ol₂ меньше, чем в Ol₁, и составляет 84 моль. % (см. рис. 4). Концентрации NiO в Ol₂ достигают 0,23 мас. %. Данное содержание характерно для оливинов, кристаллизовавшихся из собственно базальтового расплава. Таким образом, это порфировое выделение – фенокристы.

Зерна оливина Ol₃ незональны и представлены мелкими гомогенными зернами с содержанием форстеритовой составляющей, равной 0,70–0,74 мас. % (см. рис. 4). По своему составу Ol₃ соответствует краевым частям «базальтового» оливина. При этом концентрации NiO достигают 0,16 мас. %, а CaO – 0,45 мас. %.

Таблица 1

Представительный химический состав оливинов, мас. %

Table 1

Representative chemical composition of olivines, wt %

Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	123-1	123-2	123-3	123-7	123-8	123-11	123-12	123-13
	Ксеногенный оливин / Xenogeneic olivine							
	Центр / Center			От центра к краю / From center to margin			Край / Margin	
SiO ₂	40,59	40,79	40,59	38,64	39,15	40,28	38,73	38,58
FeO	9,65	9,36	9,31	19,62	17,08	12,14	20,27	20,21
MnO	0,14	0,11	0,10	0,42	0,30	0,21	0,41	0,42
MgO	49,27	48,40	48,50	39,96	42,24	46,56	39,67	39,57
CaO	0,10	0,09	0,10	0,46	0,25	0,11	0,46	0,43
NiO	0,35	0,37	0,32	0,16	0,26	0,30	0,14	0,13
Сумма / Total	100,10	99,12	98,92	99,26	99,28	99,60	99,68	99,34
Fo	0,90	0,90	0,90	0,78	0,82	0,87	0,78	0,78
Fa	0,10	0,10	0,10	0,22	0,18	0,13	0,22	0,22
Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	112-65	112-68	112-73	112-72	123-121	123-122	110-25	110-26
	Базальтовый оливин / Basalt olivine				Мелкое зерно оливина / Fine olivine			
	Центр / Center		От центра к краю / From center to margin	Край / Margin				
SiO ₃	39,60	39,92	39,69	39,45	38,65	38,84	38,94	39,10
FeO	14,88	14,19	16,82	17,06	19,59	19,18	23,60	22,87
MnO	0,21	0,21	0,23	0,25	0,35	0,34	0,44	0,40
MgO	44,02	44,41	42,19	42,02	40,06	40,56	37,51	38,35
CaO	0,30	0,25	0,35	0,41	0,42	0,32	0,45	0,44
NiO	0,18	0,20	0,18	0,13	0,12	0,16	0,08	0,08
Сумма / Total	99,19	99,18	99,46	99,32	99,19	99,40	101,02	101,24
Fo	0,84	0,85	0,82	0,81	0,78	0,79	0,74	0,75
Fa	0,16	0,12	0,18	0,19	0,22	0,21	0,26	0,25

Таким образом, мы имеем три разновидности оливина: Ol₁ – ксеногенный (перидотитовый), Ol₂ – «базальтовый» (первая генерация), Ol₃ – мелкие однородные зерна оливина в основной массе (вторая генерация).

Пироксены. Клинопироксены, представленные диопсидом, в изучаемых породах имеют две генерации: крупные вкрапленники и мелкие зерна в основной массе. Представительный

химический состав пироксенов приведен в табл. 2.

Крупные вкрапленники зональны. Зональность выражена в увеличении TiO₂, Al₂O₃, FeO, Na₂O и уменьшении MgO от центра к краю зерна. Вероятнее всего, они образовались одновременно с базальтовым оливином (первая генерация), после чего происходило нарастание каемок на пироксенах первой генерации компонентами остаточного базальтового расплава.

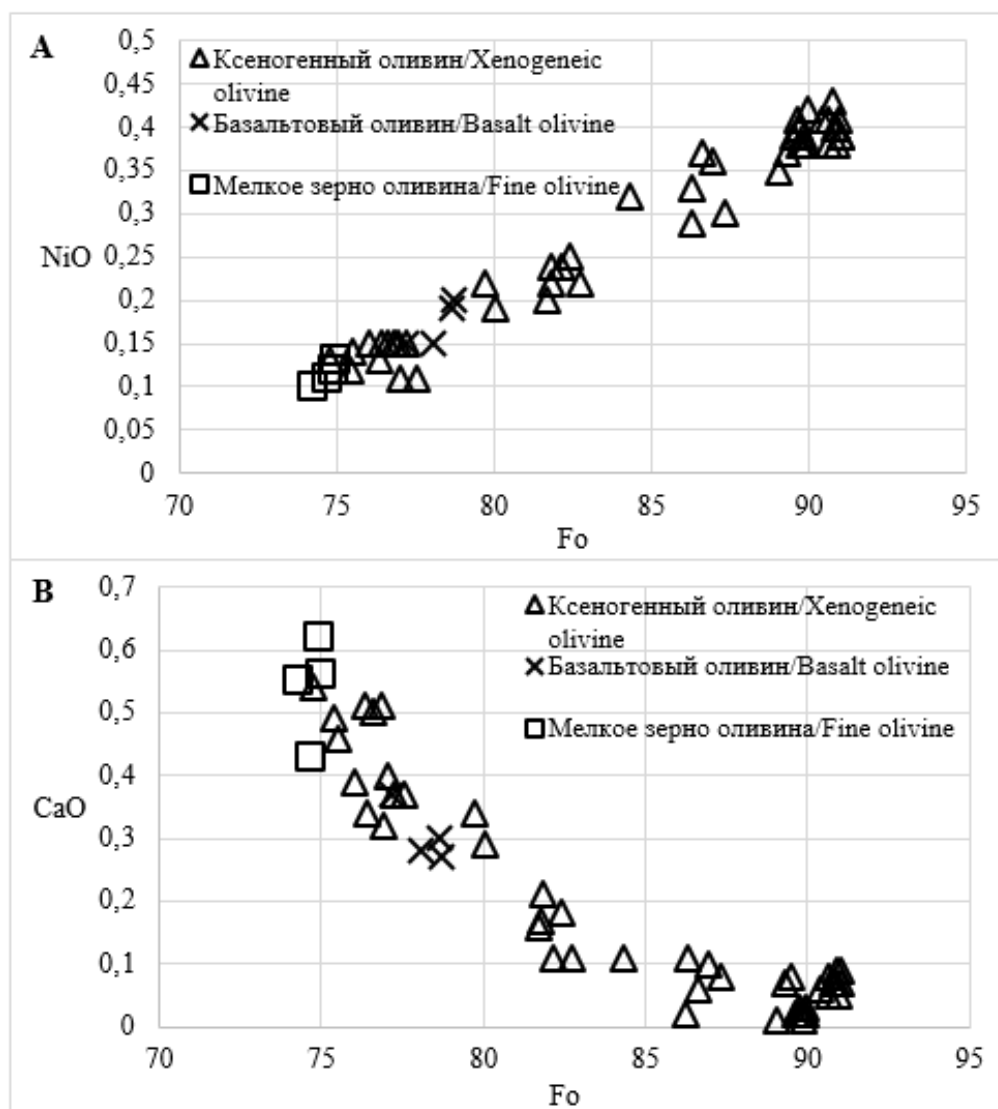


Рис. 3. Зависимости содержания CaO и NiO от Fo в оливинах различной генерации:
А – зависимость содержания CaO от Fo; В – зависимость содержания NiO от Fo
Fig. 3. Dependences of CaO and NiO content on Fo in olivines of different generation:
А – dependence of CaO content on Fo; В – dependence of NiO content on Fo

Мелкие зерна пироксенов незональны и представлены гомогенными зернами с достаточно однородным химическим составом. Они кристаллизовались из остаточного расплава, их состав практически полностью соответствует составу краевых частей крупных вкрапленников.

Плагиоклазы. Плагиоклазы образуют тонкие лейсты в основной массе. Они содержат до 78 альбитовой молекулы. Также в интерстициях были обнару-

жены натрий-калиевый полевой шпат, калиевый полевой шпат, нефелин и лейцит. Представительный химический состав полевых шпатов и фельшпатоидов приведен в табл. 3.

Окиснорудные минералы. В исследуемых образцах окиснорудные минералы представлены ильменитом, титаномагнетитом, хромит-ульвошпинелью и хромшпинелидом. В табл. 4 приведены данные об их составе.

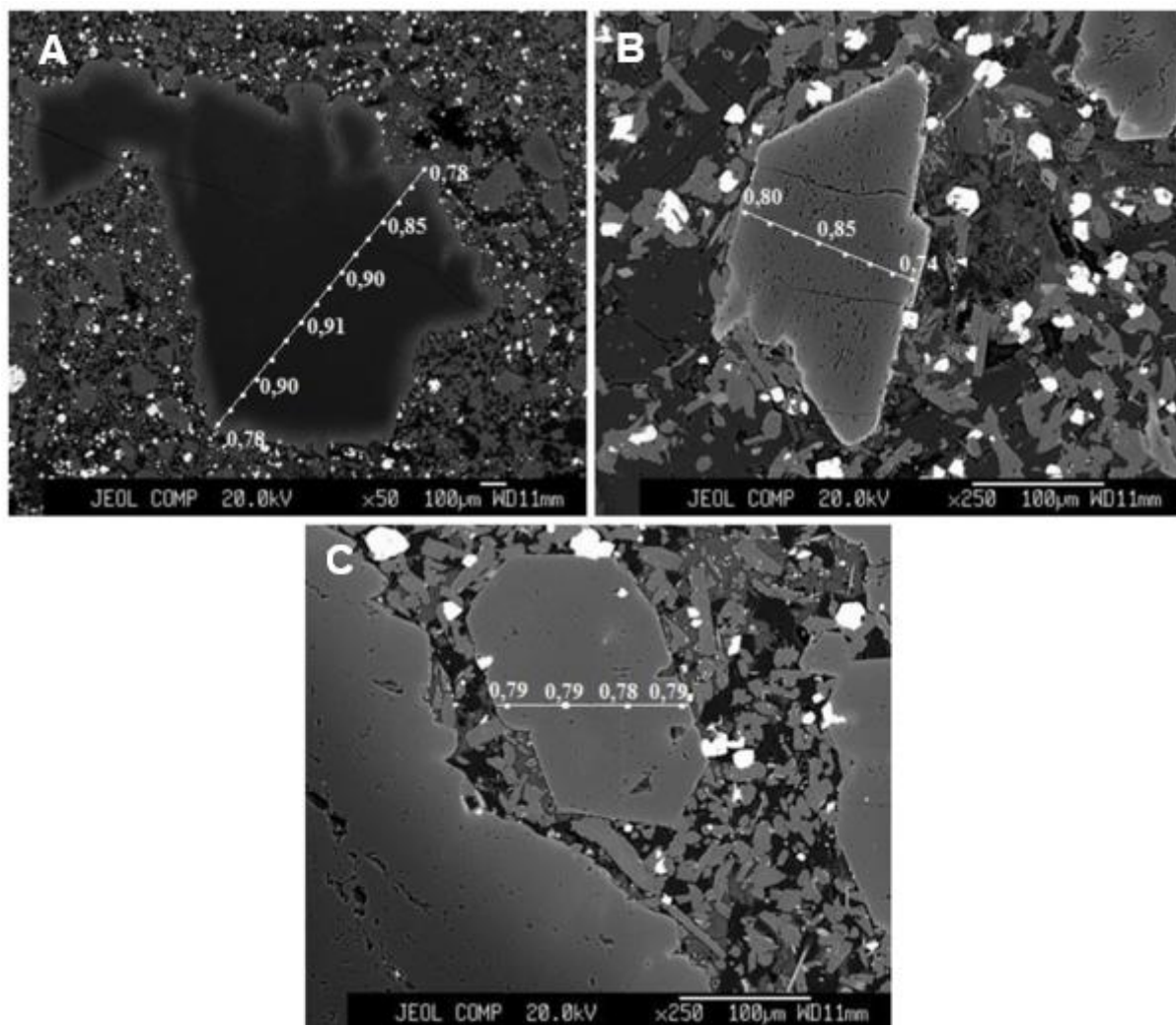


Рис. 4. Микрофотографии различных генераций оливина:
А – крупный ксенокрист оливина; В – крупный фенокрист оливина;
С – зерно оливина в основной массе

Fig. 4. Microphotographs of different olivine generations:
A – large olivine xenocryst; B – large olivine phenocryst;
C – olivine grain in ground mass

Ильмениты рассеяны в основной массе. Минерал относится к пикроильменитам с содержанием MgO до 5 мас. %. Также в минерале присутствуют примеси марганца (до 0,6 мас. %), хрома (до 0,6 мас. %), алюминия и никеля.

Титаномагнетиты наблюдаются в виде мелких зерен. Они встречаются как в виде мономинеральных зерен, так и в сростании с ильменитом. Минерал содержит большое количество примесей. В нем отмечены высокие содержания Al_2O_3 и умеренные – NiO, MnO и MgO.

Хромит-ульвошпинель представлена мелкими незональными зернами. В минерале содержится примесь хрома в значительных количествах (до 12 мас. %).

Хромшпинелиды имеют зональность, которая выражается в существенном уменьшении содержания хрома, алюминия, цинка и резком увеличении концентрации титана и железа от центра к краю зерна (рис. 5). В минералах отмечаются повышенные содержания FeO (до 60 мас. %), TiO_2 (до 13 мас. %).

Таблица 2

Представительный химический состав пироксенов, мас. %

Table 2

Representative chemical composition of pyroxenes, wt %

Показа- тель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	114-1	114-2	114-7	114-8	114-10	114-11	118-43	118-44
	Вкрапленник / Phenocryst						Мелкое зерно оливина / Fine olivine	
	Центр / Center		От центра к краю / From center to margin		Край / Margin			
SiO ₂	51,43	52,69	51,65	51,33	47,54	47,07	43,28	45,61
TiO ₂	0,26	0,28	0,44	0,37	2,58	2,52	4,30	3,51
Al ₂ O ₃	4,78	3,38	3,74	3,74	5,94	6,01	8,74	7,42
Cr ₂ O ₃	1,30	1,28	1,25	1,35	0,05	0,03	0,36	0,02
FeO	2,67	2,70	4,35	3,94	6,56	6,70	7,38	6,99
MnO	0,08	0,07	0,09	0,10	0,11	0,12	0,10	0,11
MgO	15,07	16,38	14,82	14,53	12,64	12,37	10,73	11,82
CaO	21,36	21,67	21,47	21,79	22,55	23,05	21,95	21,82
Na ₂ O	0,64	0,57	0,67	0,66	0,57	0,54	0,71	0,70
K ₂ O	0,16	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,36	0,10
Сумма / Total	97,75	99,05	98,48	97,81	98,55	98,41	97,92	98,09
Wo	46,81	45,46	45,90	47,02	48,63	49,49	49,88	48,40
En	45,95	47,82	44,10	43,62	37,94	36,97	33,92	36,49
Fs	4,70	4,54	7,40	6,80	11,22	11,42	13,26	12,28
Mg#	0,91	0,92	0,86	0,87	0,77	0,77	0,72	0,75

Из акцессорных минералов нами обнаружен фторапатит, представленный игольчатыми кристаллами (табл. 5).

Стекло. Представительные микронзондовые анализы реликтов стекла приведены в табл. 6. Как было указано выше, стекло разного цвета: от светло-серого до светло-коричневого. По своему составу стекло представлено обводненным нефелиновым твердым раствором.

Обсуждение результатов

На основе изученных особенностей составов минералов можно предположить порядок кристаллизации вулканитов. При подъеме базальтового расплава к поверхности происходил захват мантийных ксенолитов, разрушение

которых привело к появлению в базальтоидах ксенокристов оливина и хромшпинелида. Взаимодействие ксеногенных оливинов с расплавом привело к выносу Mg и Ni, привносу Fe и Mn и к образованию зональности в минералах. Данный факт подтверждается наличием фестончатых краев в этих оливинах. Далее происходила кристаллизационная дифференциация. Вероятнее всего, вначале кристаллизовались базальтовые оливины вместе с пироксенами первой генерации. Они взаимодействовали с образовавшейся силикатной жидкостью, и происходило обогащение компонентами расплава, которое приводило к образованию менее магнезиальных и более железистых краев в зернах оливина.

Таблица 3

Представительный химический состав полевых шпатов и фельшпатоидов, мас. %

Table 3

Representative chemical composition of feldspars and feldspathoids, wt %

Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	124-68	124-69	110-23	110-47	110-48	110-66	110-74	100-75
	Лейсты плагиоклаза / Plagioclase laths			Натрий-калиевый полевой шпат из интерстиций / Sodium-potassium feldspar from interstices		Калиевый полевой шпат из интерстиций / Potassium feldspar from interstices		
SiO ₂	59,26	58,87	60,71	66,18	65,48	65,85	66,12	66,59
TiO ₂	0,37	0,43	0,24	0,18	0,18	н/о	н/о	н/о
Al ₂ O ₃	26,31	25,63	22,94	20,42	20,11	17,00	16,78	17,21
FeO*	1,09	0,93	0,40	0,76	0,77	1,62	1,69	1,27
CaO	3,16	3,68	4,06	0,96	1,14	н/о	н/о	н/о
Na ₂ O	8,76	8,77	8,27	7,30	6,33	4,15	3,93	4,38
K ₂ O	0,96	0,96	1,91	6,50	6,37	11,35	11,80	11,35
Сумма / Total	99,91	99,27	98,53	102,30	100,38	99,97	100,32	100,80
Ab	78,63	76,68	70,27	60,31	56,79	35,72	33,61	36,97
An	15,69	17,78	19,07	4,39	5,63	0,00	0,00	0,00
Or	5,67	5,54	10,66	35,30	37,58	64,28	66,39	63,03
Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	124-89	113-16	113-17	111-18	116-104	116-105	150-20	150-21
	Нефелин из интерстиций / Nepheline from interstices			Лейцит из интерстиций / Leucite from interstices				
SiO ₂	45,02	45,10	46,42	56,07	55,42	55,36	55,86	56,64
TiO ₂	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Al ₂ O ₃	33,86	32,93	32,35	22,54	22,24	22,51	22,60	23,02
FeO*	0,77	0,98	0,95	0,85	0,72	0,75	-	-
CaO	1,37	0,22	0,24	0,16	0,10	0,10	0,35	0,01
Na ₂ O	14,80	15,92	14,94	0,15	0,10	0,52	0,10	0,64
K ₂ O	3,82	4,68	4,63	19,76	19,48	19,58	20,13	20,05
Сумма / Total	99,64	99,83	99,53	99,53	98,06	98,82	99,04	100,36

Примечание. FeO* – железо общее, н/о – ниже предела обнаружения 0,1 %.

Note. FeO* – total iron, н/о – lower than the detection limit 0.1 %.

Далее в условиях массовой кристаллизации образовывались оливины (Ol₃) и пироксены второй генерации, а также выделялись окиснорудные минералы (титаномагнетит, ильменит, хромит-ульвошпинель). Краевые части пироксенов обогащались алюминием, железом, титаном и натрием. В самую последнюю

очередь из силикатного расплава, обогащенного щелочами, кристаллизовались щелочные алюмосиликаты: плагиоклаз, калиевый полевой шпат, нефелин и лейцит. Наличие остаточного стекла предполагает последнюю стадию кристаллизации в приповерхностных условиях.

Таблица 4

Представительный химический состав окиснорудных минералов, мас. %
Table 4
Representative chemical composition of oxide-bearing minerals, wt %

Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	110-64	124-31	124-32	114-17	114-18	113-62	113-63	113-64
	Ильменит / Ilmenite	Титаномагнетит / Titanomagnetite		Хромит- ульвошпинель / Chromite- ulvospinel		Хромшпинелид / Chrome spinelide		
						Центр / Center	От центра к краю / From center to margin	
TiO ₂	48,57	21,49	21,40	12,78	12,83	0,36	12,05	10,31
Al ₂ O ₃	0,58	1,10	1,27	8,01	8,03	34,71	7,70	8,83
Cr ₂ O ₃	0,54	0,90	0,73	11,21	11,29	28,55	11,58	14,93
Fe ₂ O ₃	–	47,69	47,63	2,21	1,95	–	4,30	4,97
FeO	46,65	23,55	23,45	58,06	59,03	24,35	57,53	54,48
MnO	0,57	0,63	0,63	0,51	0,54	0,45	0,52	0,55
ZnO	–	–	–	0,17	0,14	0,29	0,13	0,14
NiO	0,06	0,13	0,11	0,12	0,14	0,12	0,11	0,10
MgO	4,84	3,51	3,92	5,97	6,29	12,06	5,57	5,37
Сумма / Total	101,81	99,00	99,14	99,04	100,24	100,89	99,49	99,68

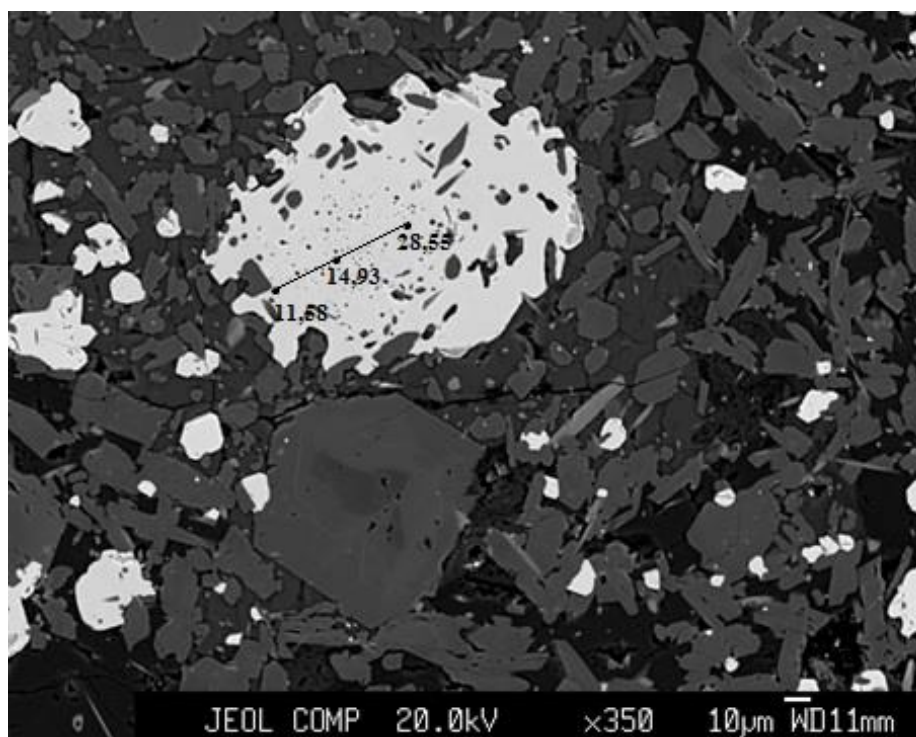


Рис. 5. Зерно зонального хромшпинелида
Fig. 5. Grain of zonal chrome spinelide

Таблица 5

Химический состав фторапатита, мас. %

Table 5

Chemical composition of fluorapatite, wt %

Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.				
	114-64	114-65	114-66	114-68	114-69
CaO	52,727	52,76	52,867	52,393	52,46
P ₂ O ₅	40,16	40,12	39,388	39,031	38,718
F	5,402	5,383	5,261	5,568	4,762
Cl	1,206	1,115	1,095	1,135	1,051
Сумма / Total	99,495	99,378	98,611	98,127	96,991

Таблица 6

Химический состав стекла, мас. %

Table 6

Chemical composition of glass, wt %

Показатель / Indicator	Номер пробы / Sample no.							
	124-98	116-101	116-102	116-46	116-47	116-49	116-50	116-21
SiO ₂	46,92	49,35	49,22	49,95	50,27	50,21	49,65	49,36
TiO ₂	0,13	0,09	0,12	0,09	0,10	0,08	0,10	0,15
Al ₂ O ₃	31,67	31,74	30,57	30,11	30,71	30,95	30,28	29,73
FeO*	1,06	0,89	0,93	0,78	0,75	0,77	0,71	1,00
MgO	0,05	0,06	0,09	0,06	0,11	0,05	0,03	0,09
CaO	1,21	0,39	0,27	0,07	0,75	0,13	0,10	0,23
Na ₂ O	11,04	9,60	11,88	11,97	12,07	9,40	13,06	10,87
K ₂ O	3,45	2,38	2,67	2,14	2,23	2,19	2,39	2,19
Сумма / Total	95,53	94,13	95,75	95,17	96,99	93,78	96,32	93,92

Примечание. FeO* – железо общее.

Note. FeO* – total iron.

Заключение

В ходе работы был установлен порядок кристаллизации расплава. При движении расплава к поверхности происходил захват мантийных ксенолитов, их дезинтеграция и растворение Ol₁. В дальнейшем при кристаллизационной дифференциации последовательно образовывались парагенезисы вкрапленников оливин + пироксен, парагенезисы микролитов оливин + пироксен + титаномагнетит + ильменит + хромшпинелид. Самыми последними кристаллизовались

щелочные алюмосиликаты: плагиоклаз + калиевый полевой шпат + нефелин + лейцит. Остаточный расплав, представленный в образцах в виде стекла, резко обогащен щелочами.

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. Работа закончена при финансовой поддержке НШ-9638.2016.5.

Библиографический список

1. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В. Северо-Монголо-Забайкальская полихронная рифтовая система (этапы формирования, магматизм, источники расплавов, геодинамика) // Литосфера. 2004. № 3. С. 17–32.
2. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатилов О.А. Геодинамическое положение новейшего вулканизма Северной Евразии // Геотектоника. 2009. № 5. С. 3–24.
3. Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Покровский Б.Г. Магматизм и геодинамика Южно-Байкальской вулканической области (горячей точки мантии) по результатам геохронологических, геохимических и изотопных (Sr, Nd, O) исследований // Петрология. 2003. Т. 11. № 1. С. 3–34.
4. Поляков А.И., Багдасарьянц Г.П. О возрасте молодых вулканов Восточной Сибири и закономерностях эволюции состава вулканитов // Геохимия. 1986. № 3. С. 311–317.
5. Костяков Н.П., Краснов В.П., Уфимцев Г.Ф., Яновский В.М. Кайнозойские базальты юга Центрального Забайкалья // Известия Забайкальского филиала географического общества СССР. 1969. Т. 5. Вып. 1. С. 11–17.
6. Ащепков И.В., Литасов Ю.Д., Литасов Д. Ксенолиты гранатовых перидотитов из меланонефелинитов хребта Хэнтей (Южное Забайкалье): свидетельство подъема мантийного диапира // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 1. С. 130–147.
7. Боролдоева В.В. Геохимия щелочных пикробазальтов хребта Хэнтей // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Т. I. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. С. 95–96.

References

1. Vorontsov A.A., Yarmolyuk V.V. North-Mongolian-Transbaikalian polychronous rift system (formation stages, magmatism, melt sources, geodynamics). *Litosfera* [Lithosphere], 2004, no. 3, pp. 17–32. (In Russian).
2. Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Bogatnikov O.A. Geodynamic setting of recent volcanism in North Eurasia. *Geotektonika* [Geotectonics], 2009, no. 5, pp. 3–24. (In Russian).
3. Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G., Kovalenko V.I., Pokrovskii B.G. Magmatism and geodynamics of the southern Baikal volcanic region (mantle hot spot): Results of geochronological, geochemical, and isotopic (Sr, Nd, and O) investigations. *Petrologiya* [Petrology], 2003, vol. 11, no. 1, pp. 3–34. (In Russian).
4. Polyakov A.I., Bagdasar'yants G.P. On the age of young volcanoes in Eastern Siberia and the patterns of volcanic composition evolution. *Geokhimiya* [Geochemistry], 1986, no. 3, pp. 311–317. (In Russian).
5. Kostyakov N.P., Krasnov V.P., Ufimtsev G.F., Yanovskii V.M. Cenozoic basalts of the south of Central Transbaikalia. *Izvestiya Zabaikal'skogo filiala geograficheskogo obshchestva SSSR* [Proceedings of the Transbaikalian Branch of the Geographical Society of the USSR], 1969, vol. 5, iss. 1, pp. 11–17. (In Russian).
6. Ashchepkov I.V., Litasov Yu. D., Litasov D. Xenoliths of garnetiferous peridotites from melanonephelinites of the Khentei Range (South Transbaikalia): evidence of mantle diapir uplift. *Geologiya i*

geofizika [Geology and Geophysics], 1996, vol. 37, no.1, pp. 130-147. (In Russian).

7. Boroldoeva. V.V. *Geokhimiya shchelochnykh pikrobasal'tov zrebta Khentei* [Geochemistry of alkaline picrobasalts of the Khentai ridge]. *Trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov imolodyh uchenyh, posvjashhennogo 130-letiju so*

dnja rozhdenija professora M.I. Kuchina [Proceedings of XXI International Symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 130th birth anniversary of the Professor M.I. Kuchin]. Vol. I. Tomsk: Tomsk polytechnic university Publ., 2017, pp. 95–96. (In Russian).

Критерии авторства

Боролдоева В.В., Медведев А.Я. подготовили статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Boroldoeva V.V., Medvedev A.Ya. 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 551.24.035+551.4.044

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-79-98>

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ РАЗНОРАНГОВЫХ ЗОН РАСТЯЖЕНИЯ В РЕЛЬЕФЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И ИХ ПРИРОДНЫХ АНАЛОГОВ

© А.С. Черемных^а, А.А. Каримова^б

^{а,б}Институт земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучить закономерности отражения структуры межблоковых зон растяжения в рельефе на различных масштабных уровнях тектонической делимости земной коры Байкальского рифта. **Методы.** В работе использовали физическое моделирование на упруго-пластичном материале (глинистая паста) с последующим построением цифровых моделей рельефа поверхностей опытных образцов. Полученные цифровые модели рельефа анализировали путем построения распределений градиента вертикальных движений. Аналогичным способом исследовали общедоступные цифровые модели рельефа природного аналога экспериментальных моделей – Байкальского рифта. Далее проводили сравнение данных, полученных при анализе двух типов цифровых моделей. **Результаты.** Получены и проанализированы распределения градиента вертикальных движений для эксперимента и градиента рельефа СЗ и ЮВ флангов Байкальского рифта. В поле градиента выделены участки, отражающие разноранговые зоны растяжения и их внутреннюю структуру. Предложена методика выделения межблоковых зон различного иерархического уровня на основе градиента рельефа природных зон. **Выводы.** Дизъюнктивные зоны, образующиеся при растяжении, и их структура отражаются в распределении градиента повышенными значениями параметра. Максимальными значениями параметра отражается магистральный сместитель зоны, несколько меньшими значениями выделяются разрывы второго порядка. Сдвиговые разрывы, образующиеся при растяжении, не выделяются особыми значениями градиента, их можно проследить по смещению локальных максимумов, приуроченных к другим трещинам. В большинстве случаев выделенные закономерности справедливы для экспериментальных и природных зон растяжения.

Ключевые слова: межблоковая зона, сбросовая разломная зона, физическое моделирование, цифровые модели рельефа, градиент вертикальных движений, градиент рельефа.

Информация о статье. Дата поступления 2 октября 2017 г.; дата принятия к печати 20 декабря 2017 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Черемных А.С., Каримова А.А. Особенности проявления разноранговых зон растяжения в рельефе экспериментальных моделей и их природных аналогов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 79–98. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-79-98

MANIFESTATION FEATURES OF DIFFERENT RANK EXTENSION ZONES IN THE RELIEF OF EXPERIMENTAL MODELS AND THEIR NATURAL ANALOGUES

© A.S. Cheremnykh, A.A. Karimova

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

^аЧеремных Алексей Сергеевич, ведущий инженер лаборатории тектонофизики,
e-mail: acherem@crust.irk.ru

Aleksey S. Cheremnykh, Leading Engineer of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: acherem@crust.irk.ru

^бКаримова Анастасия Алексеевна, ведущий инженер лаборатории тектонофизики,
e-mail: tarasova2712@gmail.com

Anastasia A. Karimova, Leading Engineer of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: tarasova2712@gmail.com

ABSTRACT. The **Purpose** of the work is to study the reflection patterns of the interblock tension zones structure in relief at various scale levels of the Earth's crust tectonic divisibility in the Baikal rift. **Methods.** The study involves the analogue modeling on elastic-plastic material (clay paste) with the following construction of digital models of the control sample surface relief. The resulting digital terrain models are analyzed by constructing the distributions of vertical motion gradient. The similar method is used to study the readily available digital terrain models of the natural analogue of the experimental models of the Baikal rift. The data obtained in the analysis of the two types of digital models are compared. **Results.** Distributions of the gradient of vertical motions for the experiment and the relief gradient of the north-west and south-east flanks of the Baikal rift have been obtained and analyzed. Sections reflecting the extension zones of different ranks and their internal structure have been distinguished in the gradient field. A procedure has been proposed to identify the interblock zones of different hierarchical levels based on the relief gradient of Earth's fault zones. **Conclusions.** The fault zones and their structure formed under extension are reflected in gradient distribution by the increased parameter values. The maximum values of the parameter are characteristic of the main fault of the zone, smaller values are referred to second-order cracks. Strike-slip cracks formed under extension are not demonstrated by special gradient values but they can be traced by the displacement of local maxima associated with other cracks. In most cases, found regularities are valid for experimental and natural extension zones.

Keywords: interblock zone, fault zone, analogue modeling, digital elevation models, gradient of vertical motions, relief gradient

Article info. Received 2 October 2017; accepted for publication 20 December 2017; available online 30 March 2018.

For citation. Cheremnykh A.S., Karimova A.A. Manifestation features of different rank extension zones in the relief of experimental models and their natural analogues. *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. 79–98. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-79-98

Введение

При характеристике разломно-блоковой структуры земной коры обычно используют такие понятия, как «межблоковая» и «разломная» зоны. В рамках данной статьи они имеют аналогичный смысл и обозначают зону контактирования блоков, которая состоит из тектоников главного сместителя, а также значительно большего по размерам объема горных пород, в котором имеют место генетически связанные с ее формированием пластические и разрывные деформации [1]. Разница двух понятий заключается в относительном ранге описываемых ими дизъюнктивных структур. Как правило, под межблоковой зоной понимается структура более высокого ранга по отношению к разломной зоне.

Известно, что любая дизъюнктивная зона характеризуется наличием внутренней структуры, под которой понимается совокупность специфических элементов, входящих в ее состав [1]: разрывы различного морфогенетического

типа, дуплексы сжатия и растяжения, складки и т. д. Каждый из элементов структуры вносит определенный вклад в формирование тектонического рельефа зоны. В зависимости от присутствия и количества определенных элементов во внутренней структуре зоны ее рельеф будет существенно различным.

Предыдущие работы [2] показали, что изучение блоковой структуры земной коры весьма эффективно осуществляется комплексом геолого-геофизических методов. Дистанционные геоморфологические методы, входящие в состав комплекса, являются его необходимой составляющей. Использование современных данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий позволяет достаточно быстро и равноценно исследовать значительные по размерам территории в отличие от большинства геологических и геофизических методов, реализация которых осуществляется по профилю (маршруту) или связана с конкретной точкой наблюдения. Однако при этом глав-

ным недостатком геоморфологических методов является неоднозначность решений, полученных при анализе рельефа, поскольку его формирование происходит в результате не только разломообразования, но и целого комплекса эндо- и экзогенных процессов. Поэтому, чтобы повысить их информативность при изучении структуры природных межблоковых зон, эффективно сначала провести исследования на экспериментальных объектах методом физического моделирования. Это позволяет на эталонных объектах установить наиболее общие закономерности проявления разноранговых зон в рельефе, которые в дальнейшем будут использованы для выделения разломно-блоковой структуры земной коры природного региона.

В качестве природного аналога в данной работе был выбран Байкальский рифт (Байкальская межблоковая зона), который формируется между Сибирским кратоном и Забайкальским блоком в условиях растяжения литосферы. Структура рифта хорошо изучена с применением геологических, геофизических и других методов исследования, в том числе посредством анализа рельефа [2–14]. Это поможет отработать методику дешифрирования природных разломных зон и позволит сравнить полученные результаты с положением на местности известных дизъюнктивов.

Таким образом, целью исследования было изучить закономерности отражения структуры межблоковых зон растяжения в рельефе на различных масштабных уровнях тектонической делимости земной коры Байкальского рифта. С прикладной точки зрения исследование внутренней структуры дизъюнктивных зон может быть полезно при поисках топливных и рудных полезных ископаемых. В первом случае установлено, что залежи углеводородов могут быть приурочены к определенным трещинам в структуре разломной зоны в зависимости от их

генетического типа и, как следствие, раскрытости и проницаемости [15]. Во втором случае месторождения рудных полезных ископаемых часто залегают в местах изгибов магистрального шва разломной зоны, а также в местах сочленения с опережающими его развитие сместителями второго порядка [16].

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- отработать методику воспроизведения обстановки растяжения в эксперименте для получения цифровой модели рельефа;

- провести исследование цифровой модели рельефа экспериментальной зоны растяжения посредством анализа пространственного распределения градиента вертикальных движений;

- используя данные космического зондирования, провести построение и анализ распределения градиента рельефа для территории Байкальского рифта;

- сравнить выделенные закономерности отражения структуры зон в эксперименте и природных условиях;

- по результатам сравнения отработать методику, направленную на выделение и анализ структуры зон растяжения земной коры.

Методика эксперимента

Общая методика экспериментов по моделированию крупных разломных зон разработана в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН С.И. Шерманом, С.А. Борняковым и К.Ж. Семинским [1, 17, 18]. Показано, что физическая модель из глинистой пасты при деформировании в лабораторных условиях проявляет упруго-пластичные свойства подобно литосфере в процессах крупномасштабного разломообразования [1]. Все эксперименты по изучению зон растяжения проводились на специальной установке «Разлом», которая предназначена для моделирования разнообразных типов тектонических структур путем перемещения в различных

направлениях ее отдельных частей – штампов. В качестве модельного материала использовалась однородная глинистая паста, удовлетворяющая основным критериям подобия при проведении экспериментов [17, 19]. В соответствии с ними 1 см модели соответствует 1 км в природной обстановке. Для достижения однотипности в формировании внутренней структуры зоны растяжения вязкость пасты поддерживалась одинаковой для всех экспериментов.

Модель, состоящая из одного слоя глинистой пасты, имела размеры 60×60 см и находилась в квадратных в плане рамках, препятствующих растеканию пасты. Она располагалась на двух штампах установки, один из которых смещался в горизонтальном направлении с постоянной скоростью (5 мм/мин), создавая обстановку растяжения для центральной части модели. Внутренние поверхности рамок обрабатывались вазелином, чтобы уменьшить трение о них глинистой пасты, которое увеличивает влияние краевых эффектов, негативно сказывающееся на формировании структуры зоны растяжения. С помощью двух подложек, расположенных друг на друге и закрепленных на штампах установки «Разлом» (подвижный и неподвижный), исключался эффект провисания центральной части модели при ее растяжении.

Результатом эксперимента являлось образование в модели межблоковой зоны растяжения, отражающейся в рельефе двумя встречно направленными по падению уступами со сравнительно небольшим опущенным блоком между ними (рис. 1). В целом такая структура представляет грабен. Необходимо отметить, что центральная впадина растяжения также имеет разломное строение, хотя разрывы в ее пределах не доходят до поверхности модели. Это явление возникает в силу физической ограниченности модели снизу двумя подложками; при их отсутствии на месте центральной

впадины находилась бы крупная зияющая трещина. Последнее не характерно для природной обстановки, где центральная трещина растяжения обычно заполнена осадками и/или водой. Таким образом, применение подложек, дающих лишь небольшую свободу вертикального перемещения глинистому субстрату, в большей степени соответствует картине деформаций природного объекта. Перемещение штампов установки «Разлом» происходило до момента, когда разломные зоны в структуре растяжения достигали стадии полного разрушения [1], то есть до формирования в их пределах магистральных сместителей.

Измерения рельефа поверхности модели выполнялось по сети из 13 профилей по 50 пикетов каждый, проведенных вкрест простираения межблоковой зоны растяжения. Сеть профилей охватывала практически всю экспериментальную модель по длине и ширине за исключением краевых частей. Расстояние между профилями – 3 см, между пикетами – 1 см. На каждом пикете измерялось значение высоты рельефа с точностью ±1 мм при помощи лазерного дальномера, закрепленного на одной высоте относительно исходной поверхности экспериментальной модели. На основе измеренных значений отметок высот был рассчитан средний градиент изменений углов наклона рельефа (градиент вертикальных движений) для каждого пикета по формуле

$$|grad| = \frac{h_A - h_B}{l_{AB}},$$

где $h_A - h_B$ – разность отметок высот двух соседних пикетов профиля, м; l_{AB} – расстояние между ними, м. Заключительным этапом обработки экспериментальных данных было построение распределения градиента в изолиниях с помощью современных программных средств (см. рис. 1).

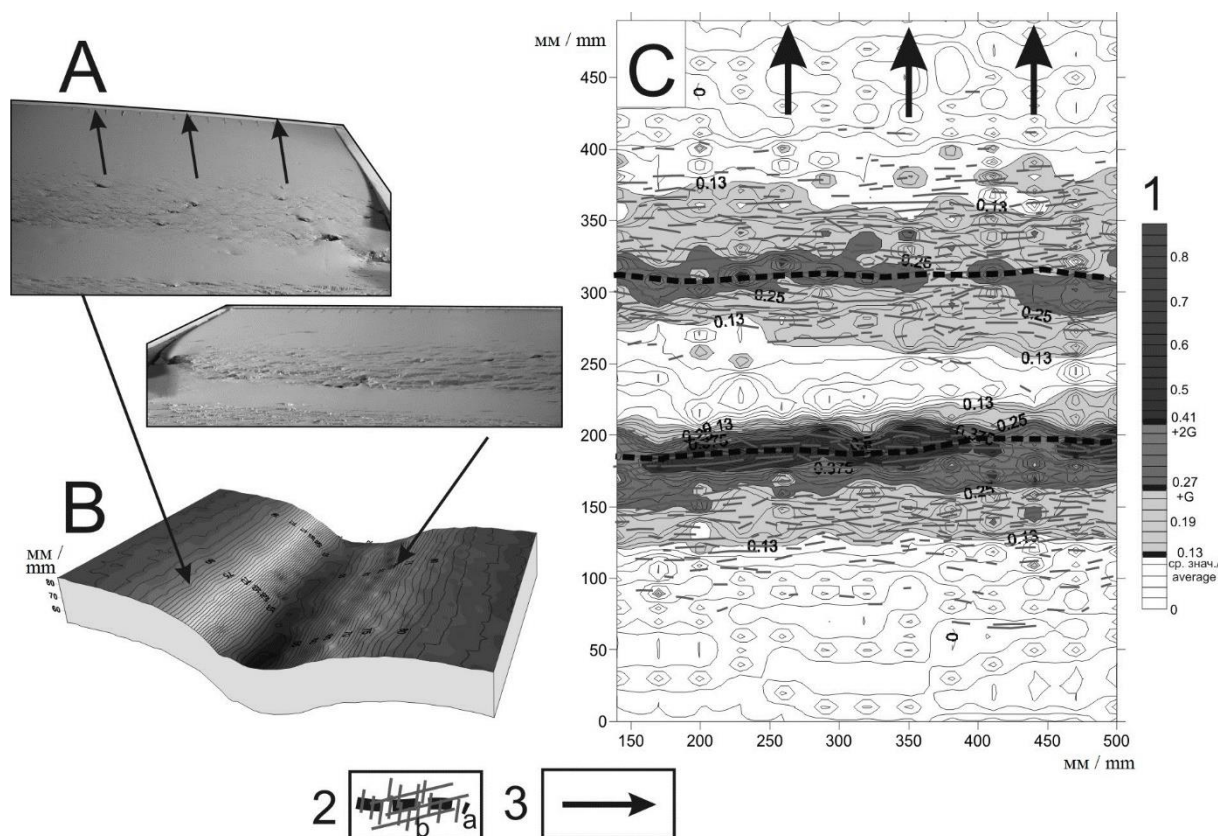


Рис. 1. Результаты физического моделирования зоны растяжения в упруго-пластичной модели:

A – фотографии, отражающие особенности рельефа сбросовых зон над разными штампами установки «Разлом»; B – цифровая модель рельефа; C – распределение величин градиента вертикальных движений на поверхности модели в изолиниях
1 – шкала величин градиента вертикальных движений; 2 – разрывы, выделенные на поверхности модели (a – магистральный сместитель, b – сопутствующие разрывы);
3 – направление перемещения активного штампа установки «Разлом»

Fig. 1. Results of extension zone analogue modeling in an elastic-plastic model:

A – images reflecting relief features of the fault zones above the various stamps of the “Razlom” installation; B – digital terrain model; C – distribution of the values of the gradient of vertical motions on the model surface in isolines
1 – scale of vertical motion gradient values; 2 – faults identified on the model surface (a – main fault, b – concomitant cracks); 3 – movement direction of “Razlom” installation active stamp

**Методика построения
цифровых карт рельефа
природных регионов**

В основу построения карт природных аналогов были положены цифровые модели рельефа Aster GDEM2 [20]. Эти модели обладают пространственным разрешением выше среднего (15–30 м) и сравнительно небольшой ошибкой по высоте, что приемлемо для подобного рода исследования. На цифровых моделях рельефа Aster СЗ и ЮВ флангов Байкальского рифта была проведена сеть профи-

лей вкрест простираения Байкальской впадины; шаг между пикетами в профиле составлял 1500 м; расстояние между профилями – 1500 м. Далее для каждого пикета в сети профилей рассчитывался градиент изменений углов наклона рельефа (градиент рельефа) по формуле, приведенной выше. По полученным значениям градиента рельефа при помощи современных программных средств строилась цифровая карта распределения данного параметра в изолиниях. При построении распределений градиента рельефа для

территории Байкальского рифта использовались различные параметры ячейки интерполяции. В дальнейшем из всех вариантов карт выбирался наиболее оптимальный вариант по степени сглаженности и детальности построения. Выбранная карта дополнялась линеаменами (спрямленными элементами рельефа), выявленными при анализе модели Aster. Эти линеаменты были разделены на мелкие, крупные и протяженные, т. е. отнесены к различным масштабным рангам.

Несмотря на то, что градиент вертикальных движений для экспериментальных моделей и градиент рельефа для природных объектов рассчитывались по одной формуле, они не равнозначны по сути. В эксперименте отсутствует влияние экзогенных процессов, что дает право назвать рассчитанный параметр градиентом вертикальных движений. В случае с природными территориями для построения градиента вертикальных движений необходимо сначала выделить экзогенно-активный слой, а затем произвести расчет по рассматриваемой формуле [4, 14, 21]. Однако при таком подходе происходит небольшое сглаживание рельефа, которое не отразится при выделении границ крупных межблоковых зон (таких, как Байкальская в целом), но может повлиять на внутреннее строение более мелких (Приморская, Джидино-Удинская). В целом с увеличением ранга разломной зоны влияние сглаженности рельефа проявляется сильнее. Поэтому, чтобы исследовать зоны различного ранга равнозначно, мы производим построение градиента рельефа, т. е. без выделения экзогенно-активного слоя.

Анализ экспериментальных моделей

Анализ экспериментальных моделей проводился в несколько этапов. На начальном этапе по фотографии поверхности (см. рис. 1, А) модели были зафиксированы все образовавшиеся разрывы

(см. рис. 1, С). Затем сеть разрывов сопоставлялась с цифровой моделью рельефа (см. рис. 1, В) и распределением градиента (см. рис. 1, С). Считалось, что значения градиента выше среднего уровня являются аномальными, отражают границы разломной зоны и влияние на рельеф ее внутренней структуры. Этот допуск основан на предыдущих работах, касающихся сдвиговых зон [22], где показано, что их границы и внутренняя структура хорошо отражаются в поле градиента значениями выше среднего уровня. Также для наглядности в распределении параметра были отражены уровни стандартного и двух стандартных отклонений от среднего.

Эксперимент показал, что межблоковая зона растяжения отчетливо выделяется грабеноподобной структурой, главными элементами которой являются сбросовые зоны, образующие уступы в рельефе (см. рис. 1). Интенсивность вертикальных перемещений по разрывам в пределах разломных зон неодинакова. Это связано с тем, что один штамп установки оставался неподвижным в ходе эксперимента. Менее интенсивные перемещения наблюдались в зоне разлома, находящейся над подвижным штампом, а более интенсивные перемещения – над неподвижным.

В поле градиента межблоковая зона отражается двумя участками с аномальными значениями и областью минимальных значений, находящейся между ними (см. рис. 1, С). Каждому из двух участков соответствует сбросовая разломная зона, отражающаяся уступом в рельефе модели, а области, заключенной между ними, – впадина растяжения. В отличие от рельефа градиент более однозначно выделяет границы разломных зон, магистральные сместители и отдельные разрывы.

Распределение градиента неравномерно не только в пределах всей межблоковой зоны, но и в каждой из разлом-

ных зон. В масштабе межблоковой зоны неравномерность связана с входящими в ее структуру двумя сбросовыми зонами и участком соответствующего впадине растяжения, о котором упоминалось выше. Также неравномерность распределения градиента для межблоковой зоны отражается в разнице величин параметра в сбросовых разломных зонах, что связано с интенсивностью перемещений в их пределах. Более высокие значения наблюдаются в разломной зоне над неподвижным штампом установки. Это можно отчетливо проследить по уровню стандартного отклонения в распределениях параметра.

В рамках отдельно рассматриваемой сбросовой зоны распределение градиента неравномерно в поперечном и продольном направлениях, что отражает сложность их внутреннего строения. Поперечная неравномерность связана с магистральным сместителем, а также с опережающими его развитие сбросовыми разрывами более высокого порядка. Магистральный сместитель выделяется максимальными значениями градиента, которые смещены от оси разломной зоны к периферии со стороны впадины растяжения (см. рис. 1). Более мелкие опережающие сбросы отражаются небольшими локальными максимумами градиента с меньшими, чем у магистрального сместителя, значениями.

Необходимо заметить, что направление падения опережающих сбросов может быть противоположным. Часть разрывов имеет наклон в ту же сторону, что и магистральный сместитель (в сторону центральной впадины растяжения), а другая часть – в противоположную. Поскольку в механическом отношении сброс является сдвигом со смещением по падению, описанные разрывы являются трещинами R- и R'-типа соответственно [1, 23]. Влияние на распределение и величину градиента вертикальных движений разрывов R-типа существенно

выше, чем у разрывов R'-типа, однако оно несравнимо с воздействием на параметр магистрального сместителя. Данный вывод справедлив для обеих сбросовых зон, однако у зоны над неподвижным штампом значения градиента в пределах всех разрывов будут в целом несколько выше, чем у аналогичных, сформировавшихся над подвижным штампом.

В продольном направлении неравномерность распределения градиента связана главным образом с небольшими сдвиговыми разрывами второго ранга по отношению к общему растяжению модели. Они не выделяются определенными значениями параметра, однако их можно проследить по смещению максимумов, приуроченных к области магистрального шва зоны (см. рис. 1, С). Другие структурные элементы сбросовой зоны выражены слабо или не проявлены в рельефе и градиенте вертикальных движений. В целом данный подход с использованием физического моделирования дизъюнктивных зон и последующим комплексным анализом цифровых моделей рельефа и распределений градиента вертикальных движений для экспериментальных поверхностей показал свою высокую эффективность при подобных исследованиях. Полученные результаты в дальнейшем будут служить хорошей основой для выделения схожих закономерностей у природных аналогов и взаимного сравнения эксперимента и природы.

Анализ природных объектов и их сравнение с экспериментальными моделями

Анализ территории Байкальского рифта подобно анализу экспериментальных данных проводился в несколько этапов. Первоначально на цифровой модели рельефа Aster были выделены мелкие линеаменты, входящие в границы исследуемого района. Далее проводилась пошаговая генерализация выделенных разрывов: при кулисном расположении сравнительно мелкие линеаменты объ-

единялись в единую более крупную структуру. Для объективного отражения разломной сети территории выявленные таким образом линеаменты сопоставлялись с крупными разрывными структурами, представленными на геологических картах и схемах изучаемого региона [6, 9]. В последнюю очередь проводился расчет и выполнялось построение распределения градиента рельефа.

Байкальский рифт в данной работе выступает как эталонный объект для сравнительного анализа. Его структура детально изучена различными геолого-геофизическими методами [11], установлены границы составляющих зон растяжения различного ранга. Рифт имеет сложное строение, и вначале необходимо сопоставить природные и экспериментальные зоны на основе теории подобия. Природными аналогами структур, воспроизведенных в эксперименте, являются межблоковые и разломные зоны Байкальского рифта, которые, согласно принятой нами классификации [11], можно разделить на три ранга. На глобальном уровне это плечи Байкальского рифта и рифтовая впадина оз. Байкал, составляющие в совокупности Байкальскую межблоковую зону, а также и некоторые другие межблоковые зоны северовосточного простираения данного иерархического уровня (например, Монголо-Охотская). Этому масштабному уровню соответствует зона растяжения, формирующаяся во всем объеме экспериментальной модели (см. рис. 1). К трансрегиональному уровню следует относить Обручевскую, Черско-Баргузинскую, Джидино-Витимскую и другие сбросовые разломные системы (рис. 2, В). При переходе от природной ситуации к экспериментальной модели они соответствуют разломным зонам, образующимся на бортах смоделированной структуры растяжения. На региональном уровне это крупные разломные зоны, такие как Приморская, Морская, Дельтовая, Бортовая и др. Этот

масштабный уровень соответствует отдельным разрывам на поверхности модели, в частности магистральному шву, входящему в состав внутренней структуры экспериментальных разломных зон.

В рельефе земной поверхности Байкальский рифт представлен грабеном, являющимся частью Байкальской рифтовой системы, располагающейся на Саяно-Байкальском поднятии [7]. Основные перемещения в результате рифтогенеза приурочены к центральной впадине, заполненной водами оз. Байкал, и плечам рифта, где формируются преимущественно сбросовые подвижки. Сбросовые зоны, слагающие плечи рифта, как правило, представлены в рельефе крупными уступами с различным падением относительно оси рифта. Так, зона Обручевского сброса, включающая Приморскую и Морскую межблоковые зоны, на СЗ фланге рифта и Черско-Баргузинская зона на ЮВ фланге имеют встречное направление падения и обрамляют впадину оз. Байкал, образуя грабен. Одноранговые с ними Прихребтовая и Джидино-Витимская зоны сонаправлены по падению на ЮВ и ограничивают Байкальскую зону по периферии. Стоит отметить, что отражению в природном рельефе Прихребтовой и Джидино-Витимской, по видимому, способствовал экзогенный фактор, поскольку в рельефе экспериментальной модели аналогичные зоны не выражены.

Анализ распределения градиента рельефа показал, что Байкальская межблоковая зона выделяется повышенными значениями параметра (рис. 3). Платформенная территория СЗ фланга рифта отражена существенно меньшими значениями градиента, такая же картина характерна для Центрально-Азиатского складчатого пояса на ЮВ фланге. Далее по направлению только южная часть исследуемого района представлена высокими значениями параметра, где проходит северная граница Монголо-Охотской

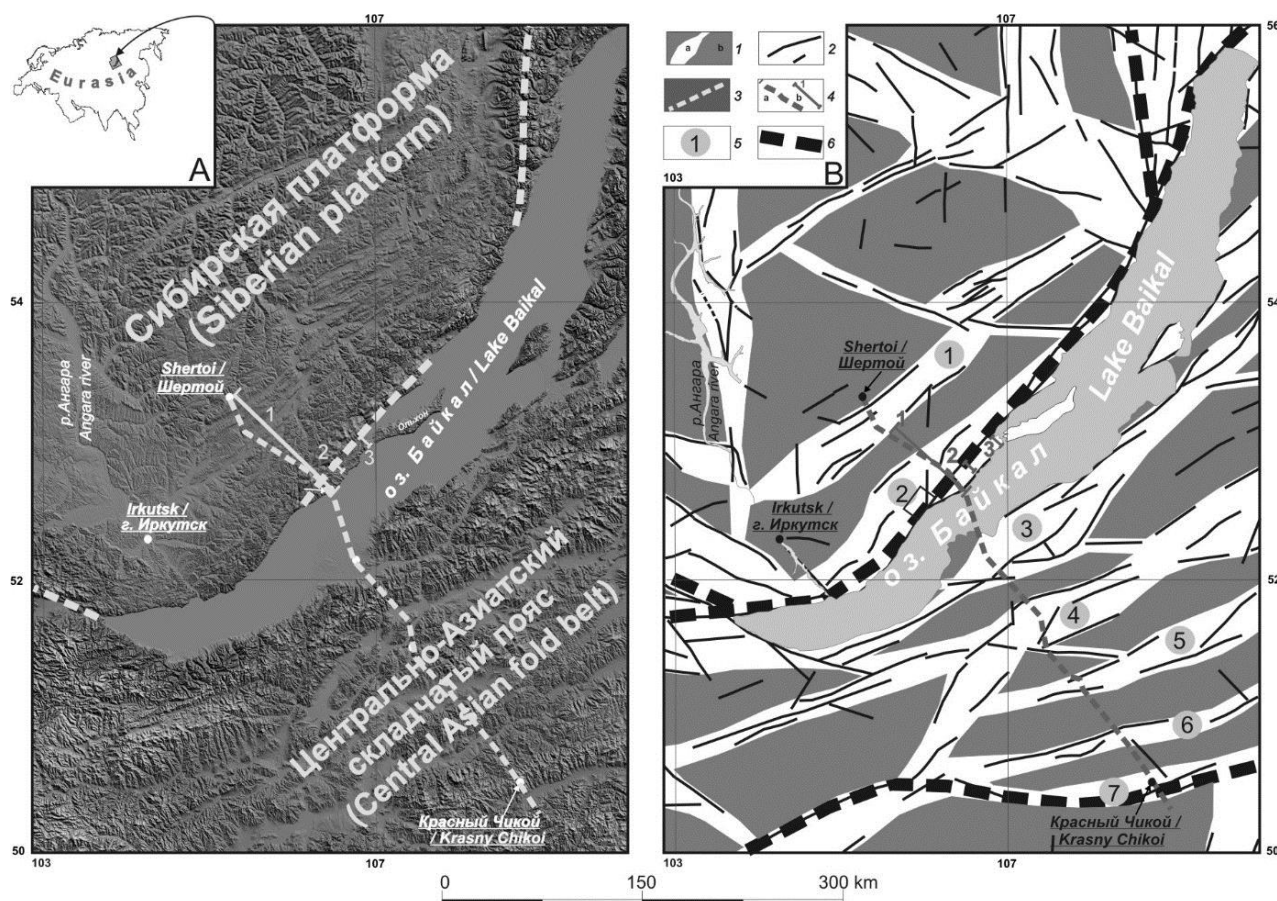


Рис. 2. Трехмерная модель рельефа (А) и построенная на ее основе схема зонно-блоковой структуры земной коры (В) Прибайкалья и Западного Забайкалья [2]:
1 – межблоковые зоны (а) и блоки (b); 2 – разломы, отчетливо выраженные линейными элементами рельефа;
3 – краевой шов Сибирской платформы; 4 – линии трансекта (а) и менее протяженных профилей (b) геолого-геофизических исследований, представленных в источнике [2]; 5 – межблоковые зоны:
1 – Предбайкальская, 2 – Обручевская, 3 – Черско-Баргузинская, 4 – Джида-Витимская,
5 – Тугнуй-Кондинская, 6 – Хилокская, 7 – Чикой-Ингодинская;
6 – границы крупных литосферных блоков

Fig. 2. 3D terrain model (A) and constructed on its basis diagram of the zone-block structure of the Earth's crust (B) of the Baikal region and the Western Transbaikalian region [2]

1 – interblock zones (a) and blocks (b); 2 – faults sharply defined by relief lineaments; 3 – marginal suture of the Siberian platform; 4 – lines of transect (a) and less extensive profiles (b) of geological and geophysical studies presented in the source [2]; 5 – interblock zones: 1 – Cisbaikalian, 2 – Obruchevskaya, 3 – Chersko-Barguzinskaya, 4 – Dzhida-Vitimskaya, 5 – Tugnui-Kondinskaya, 6 – Khilokskaya, 7 – Chikoi-Ingodinskaya; 6 – boundaries of large lithospheric blocks

межблоковой зоны, сопоставимой по рангу с Байкальским рифтом. Таким образом, границы зон растяжения первого порядка наилучшим образом отражаются в поле градиента рельефа.

Распределение градиента в рамках Байкальской зоны неравномерно подобно эксперименту, с двумя участками повышенных значений (СЗ и ЮВ фланги

рифта), разделенных центральной впадиной растяжения (оз. Байкал), представленной минимальными значениями. Средние значения градиента одинаковы на флангах рифта, при этом участок исследований на СЗ фланге включает значительные платформенные территории в отличие от ЮВ плеча, что могло уменьшить величину среднего значения.

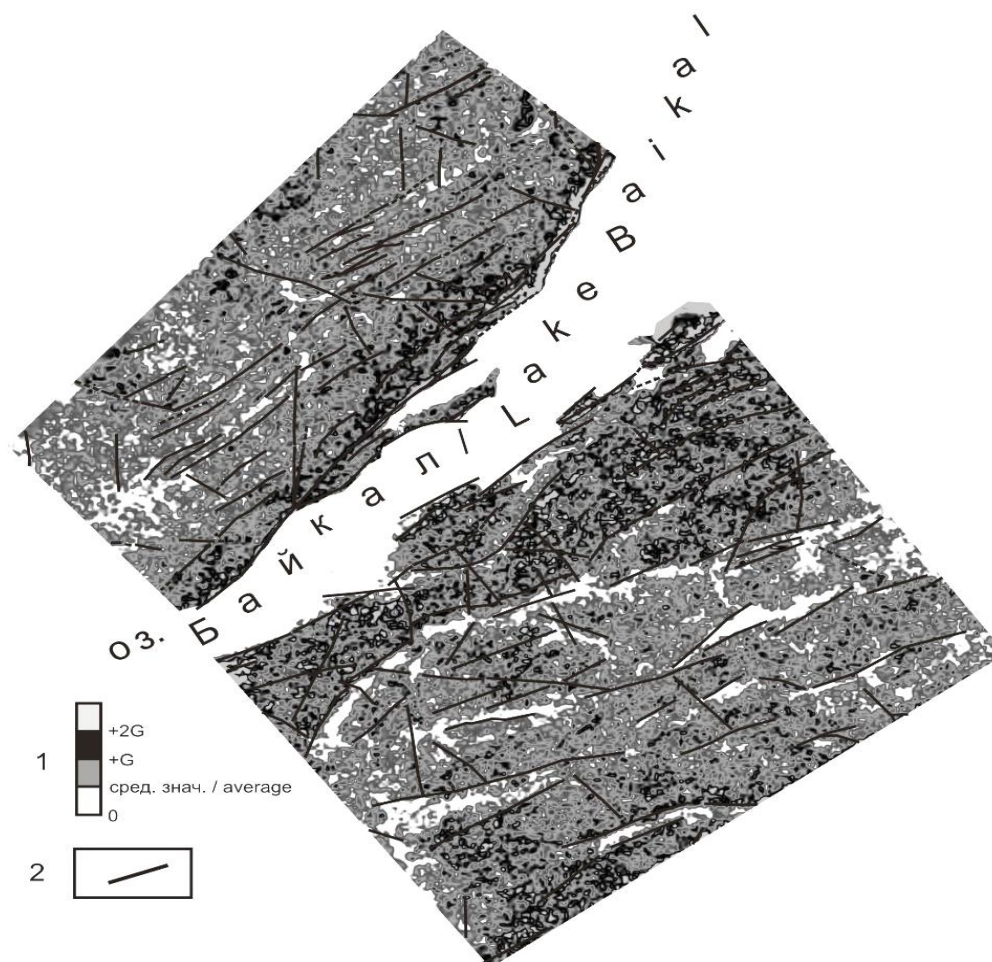


Рис. 3. Распределение градиента рельефа для СЗ и ЮВ флангов Байкальского рифта с разноранговыми линеаментами:

1 – шкала величин градиента рельефа (уровень среднего значения, стандартного и двух стандартных отклонений); 2 – крупные линеAMENTы

Fig. 3. Relief gradient distribution for the north-west and south-east flanks of the Baikal rift with different rank lineaments:

1 – scale of relief gradient values (level of the mean, standard and two standard deviations); 2 – large lineaments

В отличие от средних значений, максимальные значения параметра на СЗ фланге значительно превосходят таковые на ЮВ. Эти два фактора могут служить доказательством больших амплитуд вертикальных перемещений СЗ плеча рифта относительно ЮВ, что подобно экспериментальным данным, где на подвижном и неподвижном штампе установки «Разлом» формировались зоны с различной интенсивностью вертикальных смещений. В природной обстановке неподвижному штампу будет соот-

ветствовать СЗ плечо рифта, а подвижному – ЮВ плечо, что в свою очередь не противоречит современным данным определений GPS-геодезии [10, 11]. При общем перемещении Сибирской и Амурской плит на ЮВ последняя движется несколько быстрее, тем самым образуя структуру растяжения.

Каждый участок повышенных значений градиента, исходя из эксперимента, должен отражать крупные сбросовые системы второго и большего порядков с различным падением относительно

центральной впадины. Однако, как видно из рис. 3, выделить зоны низших рангов в распределении градиента рельефа весьма проблематично. Поэтому сначала было решено детально проанализировать график градиента по профилю проведенных ранее [11] геолого-геофизических исследований на ЮВ фланге Байкальского рифта, сопоставив его с границами выделенных в рамках исследований межблоковых зон.

Анализ графиков по профилю геолого-геофизических исследований. Было построено несколько графиков градиента рельефа по профилю, которые отличались шагом между точками измерения, это позволило проанализировать различные варианты проявления межблоковых зон в поле параметра, а также скорректировать методику построения карт его распределений в изолиниях. На графиках видно (рис. 4, В, С), что значения градиента выше среднего уровня, использованные при анализе экспериментальных материалов (см. рис. 1), в данном случае хуже выделяют границы зон. Уровень средних значений параметра часто объединяет области, принадлежащие не только межблоковым зонам, но и относительно ненарушенным (блоки) сопредельным территориям. Существенно эффективней дизъюнктивные зоны отражаются на графике градиента по уровню значений выше стандартного отклонения, что характерно для зон как высокого, так и более низкого рангов. С уменьшением шага между точками измерения по профилю с 1500 до 500 м эта зависимость проявляется еще сильнее, что особенно заметно на уровне зон низкого ранга. Полученный результат необходимо учитывать в дальнейших исследованиях с использованием градиентного анализа рельефа. При изначальном заложении профилей с шагом 500 м можно достаточно легко построить распределения параметра как через 500, так и через 1500 м.

Зоны высших рангов отражаются на графиках при объединении отдельных пиков аномальных значений (выше стандартного отклонения) градиента рельефа. Главным критерием объединения служит ширина аномальных пиков на графиках, которая должна превосходить расстояние между ними (см. рис. 4, В, С); в противном случае объединять аномалии не следует. Полученные таким способом новые аномалии следует отождествлять с дизъюнктивными зонами высшего ранга. Дальнейшее объединение по такому же принципу полученных аномалий позволяет отразить иерархию межблоковых зон различного ранга.

В целом характер графиков подтверждает эффективность описанного выше способа выделения Байкальской межблоковой зоны максимальными значениями градиента рельефа. За границами Байкальской зоны значения параметра на графиках резко уменьшаются с постепенным их увеличением по мере приближения к Монголо-Охотской межблоковой зоне. Если детально рассмотреть графики в рамках Байкальской зоны, можно выделить ряд характерных особенностей.

Так, на уровне межблоковых зон второго порядка (особенно при шаге 500 м между точками измерений) не выделяется блок (см. рис. 4, В, С), разделяющий Черско-Баргузинскую и Джидо-Витимскую зоны. Возможно, это связано с местом прохождения профиля геолого-геофизических исследований, на котором эти две зоны проходят максимально близко друг от друга или даже могут частично перекрываться. Об этом свидетельствуют расчеты, произведенные по формуле С.И. Шермана с соавторами [17], отражающей зависимость длины разломной зоны от ее ширины. Так, при минимальной и примерно одинаковой длине каждой из двух зон (даже в пределах Байкальской впадины) около 600 км их ширина будет равна примерно 18 км,

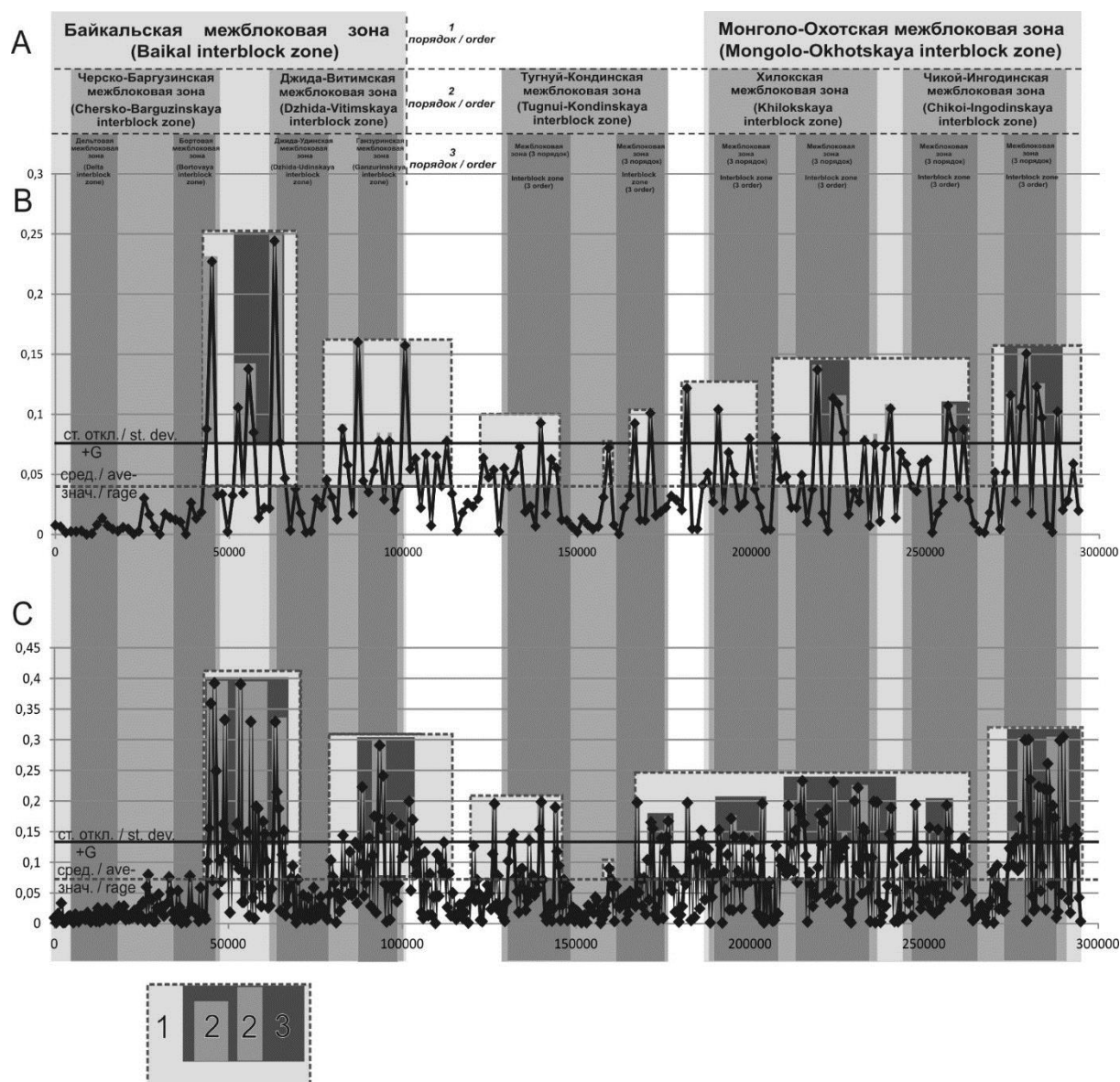


Рис. 4. Сопоставление выделенных ранее границ межблоковых зон с градиентом рельефа по профилю на ЮВ фланге Байкальского рифта:
А – иерархия и границы разноранговых межблоковых зон, выделенных комплексными геолого-геофизическими исследованиями [2]; В – график градиента рельефа по профилю геолого-геофизических исследований с шагом между точками измерения 1500 м; С – график градиента рельефа по профилю геолого-геофизических исследований с шагом между точками измерения 500 м
1, 2 – аномалии на графиках градиента рельефа, выделенные по уровню выше среднего значения (1) и стандартного отклонения (2); 3 – генерализованные аномалии выше уровня стандартного отклонения

Fig. 4. Comparison of previously identified boundaries of the interblock zones with a relief gradient along the profile on the south-east flank of the Baikal rift:
А – hierarchy and boundaries of different rank interblock zones identified by integrated geological and geophysical studies [2]; В – graph of the relief gradient along the geological and geophysical survey profile with a 1500m step between measurement points; С – graph of the relief gradient along the geological and geophysical survey profile with a 500 m step between measurement points
1, 2 – anomalies on relief gradient graphs distinguished by the level above the mean (1) and standard deviation (2); 3 – generalized anomalies above the standard deviation level

тогда как общее расстояние по профилю исследований между уступами в рельефе, отражающими магистральные швы данных деструктивных зон, – 35–38 км. Еще одной особенностью графика градиента в пределах Байкальской зоны является то, что максимумами параметра на уровне третьего порядка не выделяется Дельтовая разломная зона. По-видимому, это следует объяснять прохождением профиля через Усть-Селенгинскую впадину: на северо-востоке от нее, как следует из карты распределения гради-

ента рельефа в плане (рис. 5), Дельтовая зона отчетливо отражается максимумами параметра.

В целом можно заключить, что природные межблоковые зоны отражаются в виде сгущений участков аномальных значений градиента рельефа, превышающих уровень стандартного отклонения, в отличие от эксперимента, где подобным уровнем являются средние значения. В соответствии с полученным результатом была скорректирована методика построения и предварительного анализа карт

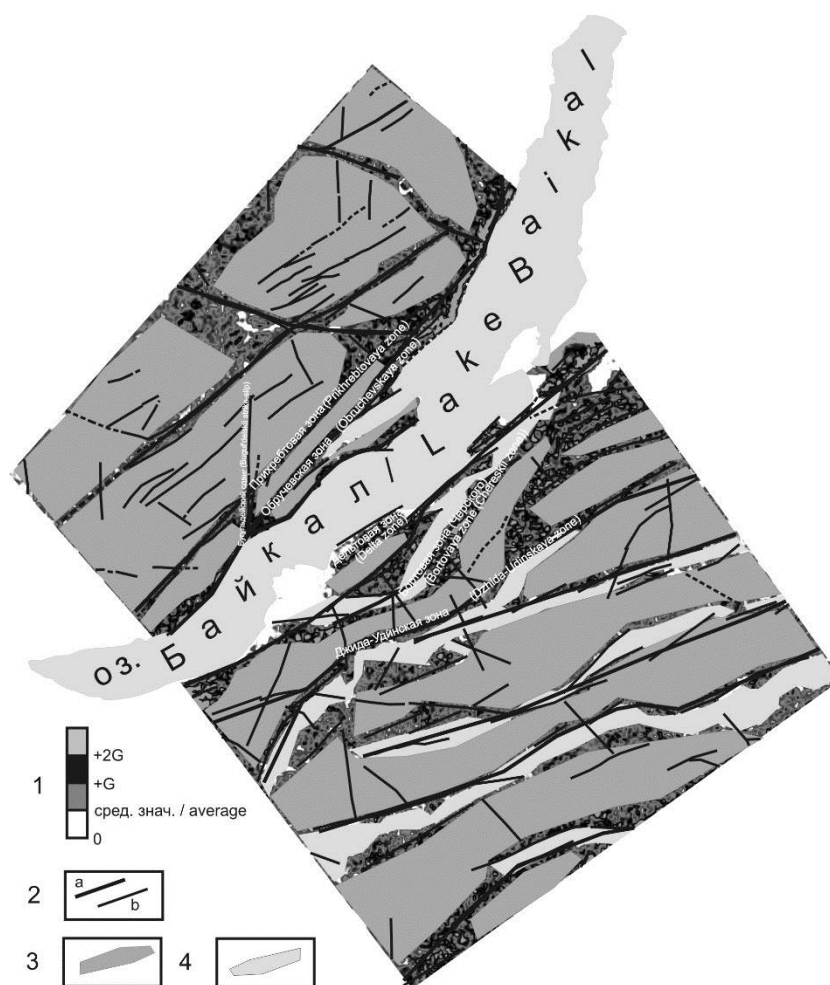


Рис. 5. Схема разломно-блокового строения центральной части Байкальского рифта, построенная на основе анализа градиента рельефа:

1 – шкала величин градиента рельефа (уровень среднего значения, стандартного и двух стандартных отклонений); 2 – протяженные (а) и крупные (б) линеаменты; 3 – блоки; 4 – впадины растяжения

Fig. 5. Diagram of the fault-block structure of the central part of the Baikal rift built on the basis of the relief gradient analysis:

1 – scale of relief gradient values (level of the mean, standard and two standard deviations); 2 – extended (a) and large (b) lineaments; 3 – blocks; 4 – tensional basins

распределений градиента рельефа в плане для изучаемой территории Байкальского рифта.

Корректировка методики. Техническое построение распределений градиента не изменилось за исключением первоначального выбора шага между точками измерений в рамках каждого профиля. Исходя из анализа графиков, рекомендуемый шаг между пикетами – 0,33–1,0 расстояния между двумя соседними профилями, что позволит отразить в дальнейшем в поле градиента основные разноранговые зоны. Карта градиента рельефа дополняется линеаменами, иерархически сгруппированными до нескольких высших рангов.

При структурном анализе карты градиента рельефа удобней начинать с выделения относительно ненарушенных территорий, т. е. блоков (см. рис. 5). Для этого в распределении градиента рельефа выбираются участки, на которых значения параметра преимущественно ниже уровня стандартного отклонения. Допускаются локальные максимумы аномальных значений внутри пространства блока. На начальном этапе к таким участкам не относятся территории с минимальными – не достигающими среднего уровня – значениями градиента, поскольку они могут отражать не только блоки, но и центральные впадины растяжения, перекрытые осадками. Границы блоков не должны пересекать крупные линеаметы. Участок с минимальными значениями исследуемого параметра отождествляется с впадиной растяжения, если аналогично эксперименту он линейно вытянут и примыкает к области повышенных значений градиента и линеаменту (а лучше к нескольким линеаментам с двух разных сторон данного участка) высшего ранга. При несоблюдении одного или нескольких критериев такой участок отождествляется с блоком. На последнем этапе отрисованные блоки группируются, не пересекая линеаментов

первого порядка (протяженные линеаменты). Выделенные таким образом оставшиеся участки на карте градиента рельефа отождествляются с межблоковыми зонами различного порядка, а также узлам их сочленения. В распределении градиента рельефа они отражаются аномальными значениями параметра (выше уровня стандартного отклонения).

Анализ итоговой карты территории Байкальского рифта. Карта, полученная при анализе рельефа территории Байкальского рифта (см. рис. 5), не противоречит предыдущим выводам, касающимся выделенных границ межблоковых зон различного ранга и полученным при проведении геолого-геофизических полевых работ [2]. Детальный анализ двух флангов Байкальской межблоковой зоны позволил установить ряд специфических особенностей отражения внутренней структуры дизъюнктивных зон более низкого ранга по отношению к ней в поле градиента рельефа. Распределение градиента неравномерно на каждом фланге Байкальского рифта в поперечном и продольном направлениях. Неравномерность отражается в изменении величины градиента в обоих направлениях и связана с разрывными структурами различного ранга. На СЗ фланге в структуре Байкальской межблоковой зоны выделяют Обручевскую межблоковую зону, на ЮВ фланге – Черско-Баргузинскую и Джида-Витимскую зоны (см. рис. 2, 5).

На СЗ фланге максимальные значения градиента рельефа в пределах Обручевской межблоковой зоны смещены к одной из ее границ, что отражает положение Приморской и Морской зон третьего порядка. Вытянутые цепочки максимальных значений исследуемого параметра в пределах вышеуказанных зон, исходя из эксперимента, должны отражать положение магистральных сместителей. По мере удаления от магистрального сместителя разломной зоны значения

градиента уменьшаются. Менее отчетливо в поле градиента отражается Прихребтовая межблоковая зона третьего порядка, четко проявленная только в центральной части рифта. Более мелкие или локальные максимумы, как правило, приурочены к узлам сочленения межблоковых зон или зонам сдвигового типа, являющимся структурами второго порядка по отношению к рифту. Так, крупный узел сочленения сразу трех зон (Приморская, Прихребтовая и зона, подходящая к ним под острым углом), отраженный сгущением аномальных значений градиента, расположен на СВ исследуемого участка, недалеко от северной оконечности острова Ольхон (см. рис. 5). Менее масштабно выглядит узел сочленения Приморской, Морской и зоны сдвига по реке Бугульдейка на ЮЗ исследуемого участка. Подобно эксперименту, в распределении градиента рельефа межблоковых зон низкого ранга можно проследить смещение или прерывистость отдельных максимумов, что, как правило, отражает положение сдвиговых зон, перпендикулярных оси растяжения Байкальской впадины. В целом в отличие от эксперимента в природных условиях сдвиговые зоны лучше отражаются в рельефе, что связано с деятельностью рек. Следует отметить, что на СЗ плече рифта описанным способом не выделились имеющиеся в его структуре впадины, в частности Бугульдейско-Чернорудский грабен. По-видимому, эти морфоструктуры имеют небольшую ширину, и для их отражения в поле градиента необходимо провести более детальные построения.

Анализ ЮВ фланга Байкальского рифта (см. рис. 5) показал, что основные закономерности проявления разноранговых межблоковых зон в градиенте рельефа, выделенные для СЗ фланга, имеют место и здесь. В отличие от СЗ фланга на ЮВ фланге к трансрегиональному уровню (второй порядок) относится не одна, а две межблоковые зоны: Черско-

Баргузинская и Джига-Витимская. Образование двух одноранговых зон на борту рифта не характерно для экспериментальной обстановки. Важной особенностью является наклон Джига-Удинской сбросовой зоны в противоположную сторону относительно главной впадины растяжения (оз. Байкал). Формирование подобного типа разрывов в эксперименте было описано выше. Главной особенностью этих разрывов является меньшая амплитуда вертикального перемещения и, как следствие, отражение меньшими величинами в поле градиента рельефа по сравнению с разрывами, имеющими падение в сторону центральной межблоковой впадины. Подобно экспериментальным данным, в поле градиента рельефа Джига-Удинская сбросовая зона выделяется понижением величин аномальных значений параметра в сравнении с Бортовой сбросовой зоной, наклоненной в сторону оз. Байкал (см. рис. 5). В отличие от СЗ плеча рифта здесь отчетливо выделяются впадины растяжения в распределении градиента рельефа. Они имеют тектоническое происхождение, что доказывается данными полевых исследований [2].

Таким образом, различие в породном составе, неодинаковые скорости перемещений, а также воздействие экзогенных процессов существенно осложняют характерные проявления в рельефе внутренней структуры зоны растяжения Байкальского рифта. Тем не менее природная ситуация на разных масштабных уровнях во многих основных чертах сохраняет главные закономерности, установленные при изучении экспериментальных моделей.

Выводы

Использованная и дополненная в ходе исследования методика физического моделирования межблоковой зоны растяжения с последующим сравнением экспериментальных моделей и природных аналогов разного масштабного

уровня позволила изучить как наиболее общие, так и некоторые частные закономерности проявления внутренней структуры межблоковых зон в рельефе.

Показано, что в экспериментальных моделях межблоковая зона выделяется двумя участками аномальных величин градиента вертикальных движений с участком значений параметра ниже среднего уровня между ними. Каждому участку аномальных значений параметра соответствует сбросовая разломная зона. Интенсивность вертикальных перемещений у сбросовых зон неодинакова и зависит от относительной скорости перемещения блоков, в которых они расположены, что отражается в величинах градиента. Распределение градиента вертикальных движений неоднородно в пределах каждой зоны растяжения различного ранга, что является следствием неравномерного формирования их внутренней структуры в поперечном и продольном направлениях. В поперечном направлении неравномерность связана с магистральным сместителем зоны, а также с опережающими его развитие крупными сбросовыми разрывами. Направление падения опережающих сбросовых разрывов в зоне разлома может отличаться до противоположного, что отражается разницей в значениях градиента. У разрывов, падающих в сторону магистрального сместителя (R-тип), значения выше, чем у разрывов, падающих в противоположную сторону (R'-тип). В продольном направлении неравномерность распределения градиента связана со сдвиговыми перемещениями, которые не выделяются отдельными максимумами параметра, но смещают участки максимальных значений, приуроченные к маги-

стральному сместителю.

Выделенные закономерности в целом справедливы для природных зон растяжения, изученных в пределах Байкальского рифта. Важной отличительной особенностью природной структурной ситуации от эксперимента является отражение межблоковых зон в поле градиента рельефа значениями выше уровня стандартного отклонения, а не средними значениями. Внутренняя структура природной зоны растяжения высшего ранга может быть представлена несколькими подзонами второго порядка в отличие от эксперимента, где происходит формирование преимущественно по одной подзоне на каждом борту впадины растяжения. При существенном влиянии на рельеф экзогенного фактора природные сдвиговые зоны, являющиеся структурами второго порядка, отражаются в распределении градиента лучше, чем отождествляемые с ними разрывы в эксперименте.

В целом предложенная методика анализа внутреннего строения разноранговых зон растяжения показала свою эффективность при исследовании территории Байкальского рифта, а полученные в ходе ее применения результаты не противоречат предыдущим выводам [2]. Часть методики, касающаяся анализа природных зон растяжения, может быть использована в качестве основополагающей в комплексе геолого-геофизических исследований разломно-блокового строения участков земной коры.

Некоторые виды работ выполнены при поддержке грантов РФФИ № 16-35-00141, № 16-05-00154 и № 16-35-00349.

Библиографический список

1. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новоси-

бирск: Гео, 2003. 244 с.

2. Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Боб-

ров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278.

3. Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. 247 с.

4. Леви К.Г. Вертикальные движения земной коры в Байкальской рифтовой зоне // Проблемы разломной тектоники / отв. ред. Н.А. Логачев, С.И. Шерман. Новосибирск: Наука, 1981. С. 142–167.

5. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / отв. ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 294 с.

6. Леви К.Г., Шерман С.И., Плюшина Л.В. Карта неотектоники Прибайкалья и Забайкалья. Масштаб 1:2500000 / под ред. Н.А. Логачева. Иркутск, 1982.

7. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.

8. Логачев Н.А. Флоренсов Н.А. Байкальская система рифтовых долин // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли / отв. ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 19–30.

9. Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянkin П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 662–667.

10. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Тектонические деформации Монголо-Байкальского региона по данным GPS-геодезии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2006. Т. 3. № 2. С. 42–51.

11. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части

Байкальской рифтовой системы по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 11. С. 1814–1825.

12. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.

13. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.

14. Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 208 с.

15. Некрасов А.И. Тектонофизический подход к анализу дислокаций для оценки напряженно-деформированного состояния объекта в условиях закрытой территории // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран (г. Иркутск, 11–16 августа 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2014. С. 30.

16. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск: Гео, 2005. 293 с.

17. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.

18. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. [и др.]. Разломообразование в литосфере: зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. 228 с.

19. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 2. С. 41–53.

20. ASTER GDEM is a product of

METI and NASA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html> (дата обращения 27.09.2017).

21. Леви К.Г. Применение количественных методов в геоморфологии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. 54 с.

22. Черемных А.С. Сдвиговая разломная зона в рельефе: анализ цифро-

вых моделей экспериментальных и природных объектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 2 (85). С. 92–103.

23. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.

References

1. Seminskii K.Zh. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon. Tekto-nofizicheskii aspekt* [Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2003, 244 p. (In Russian).

2. Seminskii K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospeeva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Zaripov R.M., Cheremnykh A.S. Interblock zones in the crust of the southern regions of East Siberia: tectonophysical interpretation of geological and geophysical data. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2013, vol. 4, no. 3. pp. 203–278. (In Russian).

3. Lamakin V.V. *Neotektonika Baikal'skoi vpadiny* [Neotectonics of the Baikal basin]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 247 p. (In Russian).

4. Levi K.G. Vertical movements of the earth crust in the Baikal rift zone. *Problemy razlomnoi tektoniki* [Problems of fault tectonics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981, pp. 142–167. (In Russian).

5. Levi K.G., Sherman S.I. *Aktual'nye voprosy sovremennoi geodinamiki Tsentral'noi Azii* [Topical issues of modern geodynamics of Central Asia]. Novosibirsk: Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2005, 294 p. (In Russian).

6. Levi K.G., Sherman S.I., Plyusnina L.V. *Karta neotektoniki Pribaikal'ya i Zabaikal'ya. Masshtab 1:2500000* [Map of Baikal and Transbaikalia area neotectonics.

Scale 1:2500000]. Irkutsk, 1982. (In Russian).

7. Logachev N.A. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2003, vol. 44, no. 5, pp. 391–406. (In Russian).

8. Logachev N.A. Florensov N.A. Baikal system of rift valleys. *Rol' riftogeneza v geologicheskoi istorii Zemli* [The role of rifting in geological history of the Earth]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977, pp. 19–30. (In Russian).

9. Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherstyankin P.P. A new electronic map of active faults for southeastern Siberia. *Doklady Akademii Nauk* [Doklady Earth Sciences], 2010, vol. 433, no. 5, pp. 662–667. (In Russian).

10. Likhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V. Tectonic deformations of the Mongolian-Baikalia region according to GPS geodesy data. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interekspo Geo-Siberia], 2006, vol. 3, no. 2, pp. 42–51. (In Russian).

11. Likhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Bykov L.M., San'kov A.V., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Kale E. GPS-measurements of recent crustal deformation in the junction zone of the rift segments in the central Baikal rift system. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2013, vol. 54, no. 11, pp. 1814–1825. (In Russian).

12. Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandel'baum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M. *Kainozoi Baikal'skoi riftovoi vpadiny: stroenie i geologicheskaya istoriya* [Cenozoic of the Baikal rift basin: structure and geological history]. Novosibirsk: Geo Publ., 2001, 252 p. (In Russian).

13. Florensov N.A. *Mezozoiskie i kainozoiskie vpadiny Pribaikal'ya* [Mesozoic and Cenozoic basins of the Baikal region]. Moscow – Leningrad: USSR Academy of Sciences Publ., 1960, 258 p. (In Russian).

14. Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., San'kov V.A., Dneprovskii Yu.I., Ras-skazov S.V. *Geologiya i seismichnost' zony BAM. Neotektonika* [Geology and seismic activity of the BAM zone. Neotectonics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 208 p. (In Russian).

15. Nekrasov A.I. *Tektonofizicheskii podkhod k analizu dislokatsii dlya otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ob'ekta v usloviyakh zakrytoi territorii* [Tectonophysical approach to the dislocation analysis for object stress-strain state assessment in a closed area]. *Tezisy dokladov Vserossiiskogo soveshchaniya s uchastiem priglashennykh issledovatelei iz drugih stran "Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuyushchie protsessy: tektonofizicheskii analiz"* [Abstracts of the All-Russia conference with the participation of invited foreign researchers "Faulting in lithosphere and associated processes: tectonophysical analysis"]. Irkutsk, 11–16 August 2014. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS Publ., 2014, pp. 30. (In Russian).

16. Seminskii K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon.*

Prikladnoi aspekt [Internal structure of continental fault zones. Applied aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2005, 293 pp. (In Russian).

17. Sherman S.I., Borneyakov S.A., Buddo V.Yu. *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya raz-lomov (rezul'taty modelirovaniya)* [Areas of dynamic fault influence]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983, 112 p. (In Russian).

18. Sherman S.I., Seminskii K.Zh., Borneyakov S.A. *Razlomoobrazovanie v litosfere: zony rastyazheniya* [Faulting in lithosphere: extension zones]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992, 228 p. (In Russian).

19. Sherman S.I., Seminskii K.Zh. Destruction zones and fault-block structures of Central Asia. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1999, vol. 18, no. 2, pp. 41–53. (In Russian).

20. ASTER GDEM is a product of METI and NASA. Available at: <http://www.jspacesys-tems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html> (accessed 27 September 2017).

21. Levi K.G. *Primenenie kolichestvennykh metodov v geomorfologii* [Application of quantitative methods in geomorphology]. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 1995, 54 p. (In Russian).

22. Cheremnykh A.S. Strike-slip fault zone in relief: analysis of experimental and natural objects numerical models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 2 (85), pp. 92–103. (In Russian).

23. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

Критерии авторства

Черемных А.С., Каримова А.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Cheremnykh A.S., Karimova A.A. 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 548.3+554.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-99-114>

КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ

© А.А. Яковлева^a, Г.Д. Мальцева^b

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

РЕЗЮМЕ. *Цель.* Анализ изменений, происходящих в кристаллической решетке минерала при кислотной активации. *Методы.* Материалом для исследования явилась глина Слюдянского месторождения. Использованные методы исследования: рентгенофазовый анализ с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance (дифрактограмма записана с помощью программы EVA, которая установлена на персональном компьютере в комплексе с дифрактометром, расчеты количественного состава проведены с помощью программы Topas 3.0); сканирующая микроскопия ориентированного образца; титриметрические методы анализа (методы нейтрализации и комплексонометрии 0; кондуктометрия (определение электрической проводимости растворов); потенциометрия (определение электрокинетического потенциала во время электрофореза); седиментационный анализ в гравитационном и центробежном полях. Для термодинамических расчетов использованы современные базы данных и программа Excel. **Результаты.** Кристаллохимический анализ структуры минерала и термодинамическая оценка условий самопроизвольного протекания процесса позволили дать объяснение характера потенциальной кривой после кислотной активации глины Слюдянского месторождения. Экстремальный характер этой зависимости связан с изменениями силового поля на поверхности частиц в результате протекания комплекса физико-химических взаимодействий, важнейшими из которых являются взаимодействия остовообразующих ионов с компонентами среды. В свою очередь, изменения энергии взаимодействия частиц глинистой массы, рассчитанной по результатам коллоидно-химических исследований, позволяют проанализировать процессы, происходящие в кристаллической решетке глины при кислотной активации. Экспериментальные данные подтверждают общность некоторых закономерностей кислотной активации глинистых минералов, связанных с тем, что процесс сопровождается вымыванием из остова кристаллической решетки ионов и образованием дефектов структуры. Дефекты кристаллической решетки с нарушением ее регулярности, переход поверхностного кремнезема в аморфное состояние обеспечивают изменение дисперсности системы и пористости глинистых образцов. **Выводы.** Использование кислотной активации для создания минеральных сорбентов с развитой пористостью оказывается предпочтительным, когда в качестве исходных используются минералы с расширяющейся структурной ячейкой.

Ключевые слова: *глинистые минералы, кристаллохимические особенности, энергия притяжения и отталкивания, междолинное пространство, кристаллическая решетка, дефекты, слоистая структура, пористость.*

Информация о статье. Дата поступления 24 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 21 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Яковлева А.А., Мальцева Г.Д. Кристаллохимические аспекты оценки энергии взаимодействия частиц глинистых минералов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 99–114. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-99-114

^aЯковлева Ариадна Алексеевна, доктор технических наук, профессор кафедры химии и пищевой технологии им. профессора В.В. Тутуриной, e-mail: ayakov@istu.edu

Ariadna A. Yakovleva, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Chemistry and Food Technology named after the Professor V.V. Tutturina, e-mail: ayakov@istu.edu

^bМальцева Галина Дмитриевна, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, e-mail: dis@istu.edu

Galina D. Maltseva, Candidate of Geology and Mineralogy, Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, e-mail: dis@istu.edu

CRYSTALLOCHEMICAL ASPECTS IN THE EVALUATION OF CLAY MINERAL PARTICLE INTERACTION ENERGY

© A.A. Yakovleva, G.D. Maltseva

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

ABSTRACT. The **goal** of the paper is to analyze the changes in mineral crystal lattice under acid activation. **Methods.** Clay from the Slyudyanka deposit is the material under investigation. The methods used in the study include x-ray phase analysis using Bruker D8 Advance diffractometer. The diffractogram is recorded using the EVA program installed on a PC in combination with the diffractometer. The quantitative composition is calculated using the Topas 3.0 program. The study also uses the methods of scanning microscopy of the oriented sample, titrimetric analysis methods (the methods of neutralization and complexometry 0; conductivity measurement (determination of solution electrical conductivity); potentiometric measurements (determination of electrokinetic potential at electrophoresis); sedimentation analysis in gravitational and centrifugal fields. Modern databases and Excel are used for thermodynamic calculations. **Results.** Crystallochemical analysis of mineral structure and thermodynamic assessment of process spontaneous flow conditions allowed to explain the nature of the potential curve after acid activation of the clay from the Slyudyanka deposit. The extreme nature of this dependence is associated with the changes in the field of force on the surface of particles as a result of the flow of the complex of physico-chemical interactions, the most important of which are interactions of backbone ions with the components of environment. In its turn, the changes in the interaction energy of clay particle weight calculated by the results of colloid-chemical studies allow to analyze the processes occurring in the crystal lattice of clay under acid activation. Experimental data confirm the similarity of some patterns of acid activation of clay minerals associated to the fact that the process is accompanied by the washout of ions from the crystal lattice skeleton and formation of structure defects. The defects of crystal lattice causing the disturbance of its regularity, the transition of surface silica in amorphous state provide the change in both system dispersion and porosity of clay samples. **Conclusions.** It is more preferable to use the acid activation for the production of mineral sorbents with developed porosity when minerals with an expanding structural cell are used as a source material.

Keywords: clay minerals, crystallochemical characteristics, energy of attraction and repulsion, intercrystalline space, crystal lattice, defects, layer structure, porosity

Article info. Received 24 November 2017; accepted for publication 21 February 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Yakovleva A.A., Maltseva G.D. Crystallochemical aspects in the evaluation of clay mineral particle interaction energy. *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, vol. 41, no. 1, pp. 99–114. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-99-114

Введение

Глинистые минералы – основа пространенных горных пород, которые широко используются с древних времен. Все большее значение они приобретают как сырье для изготовления адсорбентов [1–5]. Привлекательными качествами таких адсорбентов являются их природное происхождение, распространенность в земной коре и широкий спектр составов, а также использование достаточно недорогих предэксплуатационных технологий (методов получения).

По своей коллоидно-химической классификации глинистые минералы относятся к адсорбентам со смешанной пористостью, в которых соотношение микро-, макро- и мезапор зависит от особенностей кристаллического и субмикрокристаллического строения [6, 7].

Кроме первичной пористости, обусловленной структурой природного минерала, в глинах существенное значение имеет вторичная пористость, образованная зазорами между контактирующими частицами. В некоторых случаях поверх-

ность вторичных пор намного меньше, чем первичных, и при адсорбции небольших молекул адсорбата, проникающих в межпакетное пространство, ею можно пренебречь. Однако именно вторичная пористость становится важной, когда глинистый адсорбент предназначается для очистки среды от поверхностно-активных веществ – как правило, углеводородов, молекулы которых вследствие дифильности имеют особенности строения и проявляют особые свойства: склонность к адсорбции на границе с воздухом и мицеллообразованию [8].

Одними из основных при использовании глин в качестве адсорбентов являются проблемы структурообразования и управления их пористостью и механическими (деформационными) свойствами. Реологические свойства минеральных сорбентов зависят от молекулярных сил сцепления между элементами структуры, взаимодействия элементов между собой и с молекулами среды, особенностей их теплового движения и других факторов. Изменяя эти факторы путем химического или геометрического модифицирования, можно целенаправленно управлять свойствами сорбентов. Известны и активно используются такие методы модификации поверхности, как замена поверхностных гидроксильных групп на различные органические радикалы, ионный обмен, термическая, гидротермальная, кислотная и щелочная обработка. Однако до настоящего времени не сформировалось единого мировоззрения на механизм процессов, происходящих на поверхности и в структуре природных сорбентов при их обработке различными реагентами.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследования была использована глина Слюдянского месторождения.

Слюдянское месторождение огнеупорных глин образовалось в процессе выветривания пегматитов (рис. 1).

Месторождение, которое находится в 3–4 км от ст. Слюдянка, обнаружили возле Сухого Ручья в начале XX в. при строительстве Кругобайкальского участка железной дороги. Запасы месторождения составляют около 0,5 млн т [9].

Очистку исходной глины от примесей при подготовке образцов для коллоидно-химических исследований проводили по специально разработанной методике [10]. Первоначально вручную освобождали куски минеральной глины, отобранные непосредственно на месторождении, от коричневых прожилок оксидов железа, темных зерен оксидов марганца и других заметных невооруженным глазом примесей и включений. Затем куски дробили, измельчали с применением соответствующих механизмов или вручную в ступке, рассеивали на ситах, чтобы получить порошок с размерами частиц менее 63 мкм. Дальнейшая очистка заключалась в отмучивании, которое проводили с 4 %-й водной суспензией. Для удаления карбонатов и органических примесей и обеспечения высокой чистоты препарата применяли растворы соляной кислоты (0,001 М) и пероксида водорода (1 %). Полученные системы перемешивали на магнитной мешалке в течение 3 ч. По окончании перемешивания суспензию отстаивали 5 мин для отделения от песка, оксидов железа и других тяжелых фракций. Надосадочную жидкость оставляли на 10–15 дней для осаждения глинистых минералов. Осадок (глинистый минерал) отделяли, промывали дистиллированной водой и удаляли остатки влаги седиментацией и центрифугированием. Глину высушивали в сушильном шкафу при температуре 100 °С до постоянной массы. Полученный порошок глины вновь измельчали в ступке и хранили в бюксах.

Модифицирование глины проводили 0,1 М раствором HCl при перемешивании 4 %-й суспензии в течение 0,5 ч на магнитной мешалке. Осадок отделяли

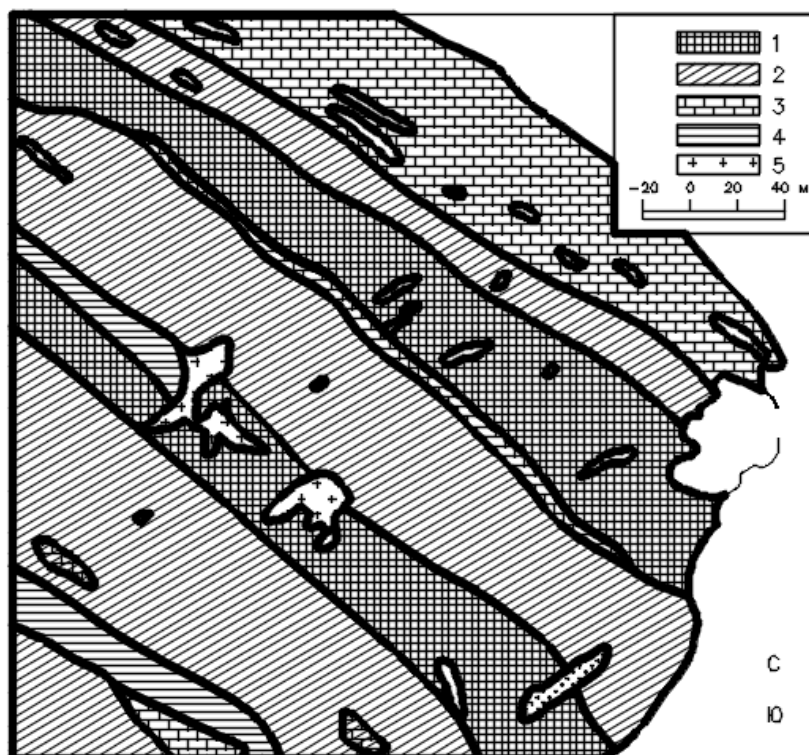


Рис. 1. Схема геологического строения района Слюдянского месторождения:

1 – пироксен-амфиболовые гнейсы; 2 – биотитовые гнейсы; 3 – мраморы;
4 – кварц-диопсидовые породы; 5 – пегматиты

Fig. 1. Diagram of the geological structure of the Slyudyanka deposit area:

1 – pyroxene-amphibole gneisses; 2 – biotite gneisses; 3 – marbles;
4 – quartz - diopside rocks; 5 – pegmatites

отстаиванием после промывания до нейтральной реакции промывных вод. Первое осаждение проводили из исходного раствора. С помощью химического анализа (качественного и количественного, преимущественно титриметрического) был исследован состав раствора для обнаружения веществ, которые появились после контакта с глиной. Для оценки влияния кислотной активации были определены необходимые физико-химические характеристики: дана оценка дисперсионного состава с помощью седиментационного анализа в гравитационном и центробежном полях, найдены электрокинетический потенциал, обменные емкости, пороги коагуляции разнозарядными электролитами и другое, то есть выполнен тот комплекс исследований, который для исходной глины представ-

лен в публикациях [10–12]. Расчет энергии взаимодействия частиц глинистой массы, подвергнутой кислотному модифицированию, проведен с использованием подходов, описанных в источнике [13].

Для характеристики воспроизводимости, исключения ошибок и оценки правильности результатов выполняли несколько определений исследуемого параметра параллельно и использовали классические методы оценки погрешности физико-химического эксперимента.

Результаты исследований

На рис. 2 представлены рассчитанные потенциальные кривые, представляющие суммарный вклад в энергию взаимодействия частиц $U(h)$ сил молекулярного притяжения $U_m(h)$ и электростатического отталкивания $U_s(h)$:

$$U(h) = U_m(h) + U_s(h).$$

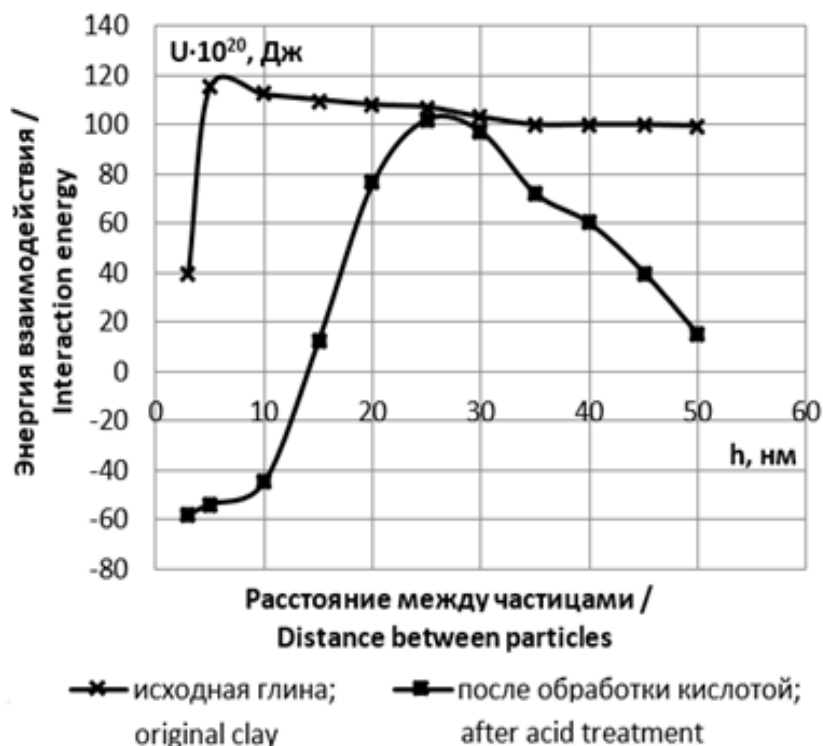


Рис. 2. Энергия взаимодействия частиц глинистого минерала
Fig. 2. Interaction energy of clay mineral particles

Выбор диапазона размеров прослойки h связан с положением некоторого минимума при $h = h_0$, для которого при $h > h_0$ между частицами действует сила притяжения; при $h < h_0$ усиливается эффект отталкивания. В качестве h_0 нами был принят размер иона H_3O^+ , равный 0,135 нм, остальные значения h заданы произвольно в пределе $h_0 < h < r$, поскольку гидратированный протон – основная частица, определяющая механизм взаимодействий.

Кислотная активация оказывает существенное влияние на свойства системы и изменяет энергию взаимодействия U минеральных частиц. При этом на больших и малых расстояниях h она всегда выше.

Вместе с тем, при $h = 30$ нм энергетические кривые сближаются, что, очевидно, связано с особенностями рельефа поверхности.

Активация минерала кислотой, по сути, представляет пример гетерогенного

взаимодействия на границе «твердое – жидкость», поэтому анализ механизма процесса предусматривает несколько этапов:

- 1) рассмотрение особенностей, в том числе поверхностных, твердой фазы;
- 2) рассмотрение особенностей растворителя;
- 3) стадии гетерогенного взаимодействия.

Особенности глинистого минерала

Глинистые породы обычно имеют полиминеральный состав, который зависит от происхождения. Рентгенографический фазовый анализ, выполненный с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance [10], показывает состав исходного глинистого минерала. Больше половины состава представлено смешанослойным монтмориллонит-мусковитом, имеются кварц, альбит и железно-магневая роговая обманка (табл. 1).

Таблица 1

Минеральный состав глины Слюдянского месторождения

Table 1

Mineral composition of Slyudyanka deposit clay

Минерал / Mineral	Смешанослойный монтмориллонит-мусковит / Mixed-layer montmorillonite-muscovite	Кварц SiO ₂ / Quartz SiO ₂	Альбит Na[AlSi ₃ O ₈] / Albite Na[AlSi ₃ O ₈]	Железно-магниева роговая обманка Ca ₂ (Mg, Fe, Al) ₅ (Al, Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₂ / Iron-magnesium hornblende Ca ₂ (Mg, Fe, Al) ₅ (Al, Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₂
Содержание, мас. % / Content, wt. %	53,2±1,5	18,2±1,8	22,3±1,6	6,3±1,2

Глинистые минералы характеризуются разнообразием неповторимых сочетаний элементарных решеток в реальной кристаллической структуре. Способ сочленения структурных элементов и их количество в элементарной ячейке определяют кристаллический тип глинистых минералов [14]. Обычно для их описания используются идеальные модели, поэтому при анализе полученных экспериментальных результатов определим кристаллохимические особенности используемого глинистого минерала исходя из этих принципов.

Известно, что глины образуются при выветривании силикатных минералов горных пород и имеют вулканогенно-осадочный и гидротермально-метасоматический генезис. Основная область формирования глинистых минералов – кора химического выветривания, которая может достигать 100 м. В зависимости от типа исходных разрушаемых пород формируются те или иные минералы.

В коре выветривания в результате физико-химических и бактериологических процессов обычно происходит разрушение силикатов и физико-химические преобразования. Образовавшийся материал представляет собой тонкообломочные осадочные породы, состоящие из

водных алюмосиликатов состава с молекулярным отношением $Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot pH_2O$ с остатками первичных материнских пород. В результате химических превращений щелочных пород и гидролиза силикатов с присоединением к остатку конституционной воды образуются глинистые минералы. По строению кремнекислородного каркаса глинистые минералы делят на три основные группы: двухэтажные (группа каолинита), трехэтажные (группа гидрослюд и монтмориллонита), смешанослойные (группа хлорита), условно $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$, каолинитовые (каолинит, дикит и накрит с одинаковым составом $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), гидрослюдистые (иллит $K_2O \cdot MgO \cdot 4Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$, глауконит, мусковит и др.). В результате гидролиза слюды постепенно переходят в гидрослюды, которые, выветриваясь, превращаются в конечном счете в каолинит или монтмориллонит. Вследствие этих превращений образуется ряд гидрослюд: гидромусковит, гидропарагонит, вермикулит, глауконит и гидробиотит. Гидрослюды по своим структурным и физико-химическим свойствам как слоистые силикаты из трехэтажных слоев занимают промежуточное положение между слюдами и глинистыми минералами.

По основным и ультраосновным магматическим породам, богатым железом и магнием, образуются железистые и магнезиальные смектиты, хлориты, серпентины, сепиолиты, палыгорскиты, гидробиотиты, нонтрониты, по кислым и обедненным фемическими элементами первичным породам – гидромусковиты, монтмориллониты, каолиниты и т. д. Не менее важной сферой формирования глинистых минералов являются процессы наложенного эпигенеза, особенно сопровождаемые воздействием растворов с CO_2 . Глинистые минералы, слагающие основную массу породы, представляют собой водные силикаты алюминия, железа и магния слоистой, слоисто-ленточной и смешанно-слоистой структур, отличающиеся от других силикатов высокой дисперсностью, гидрофильностью, способностью к сорбции и ионному обмену.

Важнейшими глинистыми минералами структуры слоистого типа являются минеральные группы каолинита, смектитов, гидрослюд, хлоритов, куда входят каолинит, диккит, галлуазит, монтмориллонит, нонтронит, вермикулит, гидромусковит, гидробиотит, глауконит, хлорит и др.

Глинистый материал Слюдянского месторождения по основным признакам относится к слоистым силикатам.

Глинистые минералы, имеющие слоистый тип структуры, имеют уплощенную листоватую форму. Главный элемент их строения – слои тетраэдрической (оксидов алюминия и кремния) и октаэдрической (оксидов магния, железа и алюминия) упаковки элементов (рис. 3).

Величина заряда слоев слоистых минералов изменяется в широком диапазоне, именно она определяет характер взаимодействия элементарных пакетов друг с другом.

Для монтмориллонита $(\text{Ca}, \text{Na} \dots)(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}] \cdot (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ актуален изоморфизм типа $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Si}^{4+}$, но к нему добавляется также изо-

морфизм типа $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$. Катионами-компенсаторами выступают уже ионы натрия, а также двухзарядные ионы кальция и магния (рис. 4).

Для мусковита $\text{K}_2\text{Al}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ характерна замена $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Si}^{4+}$ в тетраэдрах и компенсация избыточного отрицательного заряда ионами K^+ (в общем случае и другими щелочными катионами больших размеров). В результате образуются достаточно прочные ионные связи между катионами-компенсаторами и элементарными пакетами, отрицательные заряды которых располагаются вблизи поверхности. Они могут уравниваться гидратированными обменными катионами, расположенными в межпакетном пространстве минералов. По такому же механизму организованы кристаллические упаковки альбита и роговой обманки, однако в составе последней обращает на себя внимание железо.

Железо как элемент побочной подгруппы VIII группы Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева имеет сложную электронную конфигурацию атома. В минералах железо может присутствовать в виде нескольких оксидов – простого FeO , гематита Fe_2O_3 или магнетита Fe_3O_4 , которые различаются между собой характеристиками решеток, но практически утрачивают свою индивидуальность при формировании структуры слоев и межслоевых промежутков в глинистых минералах [15].

Кристаллохимический анализ глины Слюдянского месторождения необходимо дополнить сведениями об особенностях пористой структуры. Пористая структура природных минералов может быть двух типов. У минералов первого типа в зависимости от рода обменных катионов, электронной и геометрической структуры в процессе адсорбции полярных веществ решетка расширяется на 3–12 Å, и в межпакетное пространство внедряется один или несколько молекулярных слоев адсорбируемого вещества.

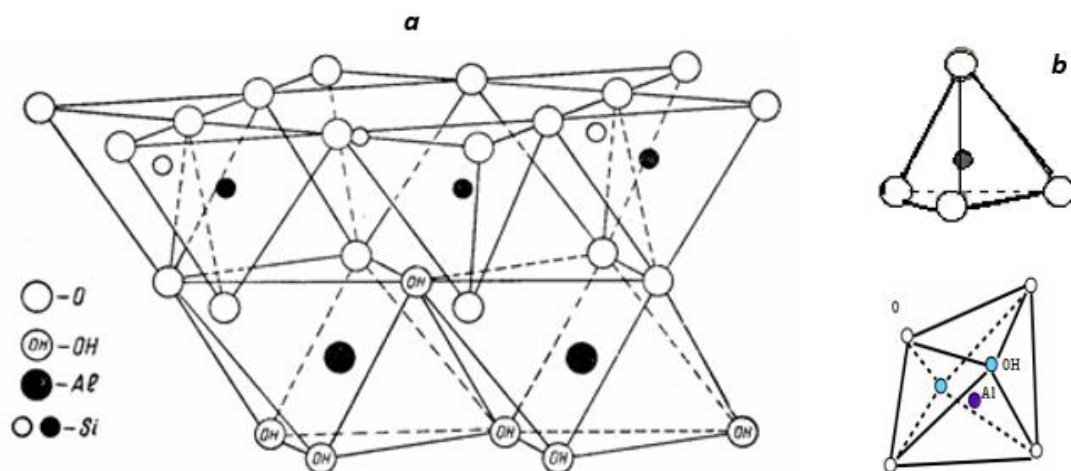


Рис. 3. Структура кристаллической решетки минералов группы каолинита (а) и составляющие фигуры: кремнекислородный тетраэдр (b) и октаэдр (с)
Fig. 3. Lattice structure of kaolinite group minerals (a) and component figures: silica oxide tetrahedron (b) and octahedron (c)

Такие микропористые адсорбенты способны изменять в процессе адсорбции размеры пор. Кроме того, в минералах с расширяющейся структурой возможно образование вторичных, в основном переходных пор, образованных зазорами между контактирующими частицами. Как правило, поверхность вторичных пор таких минералов и их объем намного

меньше поверхности и объема первичных пор, однако возникновение поверхностей контакта частиц на мезо- и даже макроуровне неотделимо от зарождения микропор. У минералов, отнесенных ко второму типу, пористость обусловлена зазорами между контактирующими частицами.

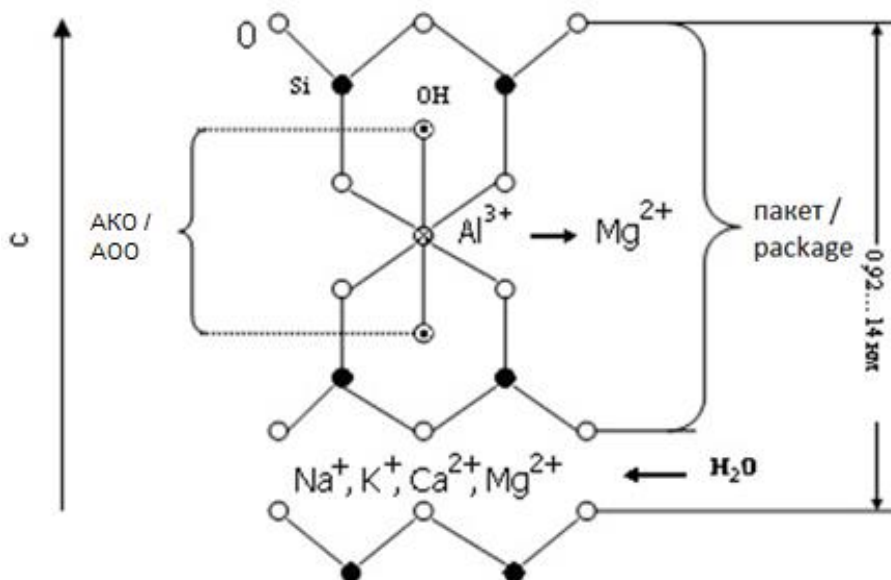


Рис. 4. Структура идеализированного монтмориллонита:
АКО – алюмо-кислородный октаэдр
Fig. 4. Structure of the idealized montmorillonite:
AOO – aluminio-oxygen octahedron

Величина удельной поверхности и размер переходных пор определяются дисперсностью частиц, которая зависит от совершенства кристаллической решетки.

К слоистым минералам с расширяющейся структурной ячейкой относятся монтмориллонит, альбит и железно-магниева роговая обманка, к слоистым минералам с жесткой решеткой – мусковит и кварц. К сожалению, расшифровка дифрактограмм рентгенофлуоресцентного анализа не обнаруживает в образцах чистых минералов монтмориллонита и мусковита. Сканирующей электронной микроскопией ориентированного образца подтверждается присутствие только смешанослойного монтмориллонит-мусковита.

Слоистое строение сильно отражается на физических, в частности поглочительных свойствах минералов [16]. Кроме геометрической неоднородности характер поверхности глинистых минералов определяется наличием адсорбционных центров различной природы: обменных катионов, атомов кислорода и гидроксильных групп на базальных гранях частиц слоистых силикатов, координационно ненасыщенных ионов Mg^{2+} , Al^{3+} , и Si^4 , а также обменных катионов и гидроксильных групп на боковых гранях и ребрах кристаллов (рис. 5).

В результате дислокаций, своеобразных трещин и других дефектов на поверхности молекулы среды одновременно связаны с неодинаковым числом атомов подложки, следовательно, энергия их ван-дер-ваальсовского (преимущественно дисперсионного) взаимодействия различна.

Особенности растворителя

Для термодинамической оценки вероятности самопроизвольного взаимодействия растворителя (соляной кислоты) с твердой фазой необходимы данные по величинам свободной энергии Гиббса возможных химических реакций

[17]. Расчеты проведены для стандартной температуры по уравнению

$$\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0,$$

где ΔH_{298}^0 – энтальпия химической реакции (тепловой эффект); ΔS_{298}^0 – ее энтропия; ΔG_{298}^0 – свободная энергия Гиббса химической реакции.

В табл. 2 представлены результаты для двух наиболее интересных реакций взаимодействия оксидов магния и алюминия с хлористым водородом.

В расчетах использованы современные базы термодинамических данных, при этом обычно предполагается, что твердые вещества имеют собственное строение кристаллической решетки без дефектов структуры, вода состоит из молекул H_2O , а для газа HCl характерно наличие ковалентной связи [18]. В подобных расчетах не отражены представления об образовании ассоциатов молекул воды, диссоциации, сольватации, гидратации и других видах межчастичного взаимодействия и их температурной зависимости, но вместе с тем сведения остаются важными и всегда предшествует более детальному анализу процессов. Судя по приведенным в табл. 2 данным, можно ожидать, что оксид магния легко удаляется из кристаллической решетки сложного состава, а вот вымывание алюминия вряд ли возможно, поскольку энергии сольватации на преодоление сил притяжения его кислородными атомами недостаточно [19].

Механизм гетерогенного взаимодействия

В табл. 3 показано изменение состава глинистого минерала по результатам качественного анализа надосадочного раствора, в котором обнаружены многие вещества, входящие в кристаллическую решетку исходного образца.

Представленные данные свидетельствуют, что кислотное активирование глинистого минерала сопровождается переходом в жидкую среду ионов калия, натрия, железа, кальция и магния

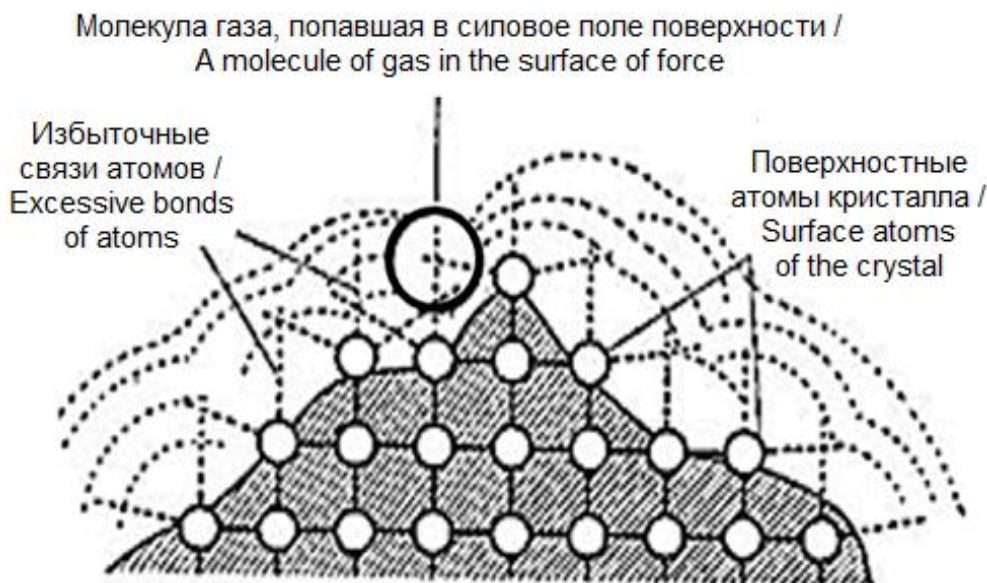


Рис. 5. Схематическое изображение силового поля на поверхности сорбента [16]
Fig. 5. Schematic view of the field of force on the sorbent surface [16]

Таблица 2

Термодинамические величины для возможных химических реакций

Table 2

Thermodynamic quantities for possible chemical reactions

Реакции / Reaction	ΔH_{298}^0 , кДж/моль / ΔH_{298}^0 , kJ/mol	ΔS_{298}^0 , Дж/(моль·К) / ΔS_{298}^0 , J/(mol·K)	ΔG_{298}^0 , кДж/моль / ΔG_{298}^0 , kJ/mol
$\text{MgO} + 2\text{HCl} = \text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-144,53	-241,15	-72,67
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} = 2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$	-36,36	-743,20	185,16

Таблица 3

Элементный состав глины после очистки

Table 3

Elemental composition of clay after purification

Элемент / Element	Si	Al	O	K	Na	Fe	Ti	Ca	Mg
Весовой процент до обработки / Weight percentage before treatment	23,86	15,87	51,79	1,06	2,38	3,05	0,45	0,23	1,24
Присутствие в растворе после обработки / Presence in the solution after treatment	Нет / No	Нет / No	–	Да / Yes	Да / Yes	Да / Yes	Нет / No	Да / Yes	Да / Yes

(что находится в хорошей согласованности с термодинамическими расчетами). Переход ионов в водную среду указывает на изменения в структуре кристаллической решетки, на рост доли кремния в твердой фазе, на возникновение дефектов исходных решеток.

Ю.И. Тарасевич и Ф.Д. Овчаренко в своей книге [6] описывают активацию некоторых глинистых минералов горячей серной кислотой и показывают, что процесс сопровождается вымыванием из кристаллической решетки значительной части оксидов магния, железа и алюминия, а также высказывают предположение об образовании значительного количества аморфного кремнезема. В настоящее время общепринято, что освободившийся в результате кислотной активации глинистых минералов кремнезем является аморфным. Образование небольшого количества аморфного кремнезема наблюдается даже при активации чистого каолинита – минерала с жесткой решеткой, обладающего среди слоистых силикатов наиболее устойчивой кристаллической решеткой [19].

В нашем случае при использовании разбавленной соляной кислоты образование значительного количества аморфного кремнезема вряд ли возможно, однако, очевидно, в небольших количествах он все-таки образуется, что подтверждают результаты седиментационного анализа.

Известно, что основой седиментационного анализа является закон Стокса, связывающий скорость осаждения частиц с их размером [1, 2]. При проведении такого анализа следили за нарастанием массы осадка из суспензии во времени. Построенная по экспериментальным данным кривая осаждения позволяет получать сведения о характере распределения частиц дисперсной системы по размерам [10, 13]. Кривые на рис. 6 показывают относительное количество фракций с известным размером частиц,

которое обычно называют функцией распределения [1, 2]. Видно, что кривые распределения частиц в рассматриваемых случаях существенно отличаются, максимум на кривой для обработанных частиц сглажен. Кислотная активация приводит к расширению диапазона размеров частиц r , обеспечивающих мезапористость.

Таким образом, формирование беспорядочной структуры следует связывать с образованием в процессе активации аморфного кремнезема (силикагеля), часть которого оказывается расположенным (заклиненным) между пакетами (в слоях и межслоевом и междоисталлитном пространстве) минерала.

Судя по данным химического анализа, довольно сильно разрушаются при обработке соляной кислотой те минералы из состава глины, для которых характерен развитый изоморфизм в тетраэдрических и октаэдрических положениях (прежде всего монтмориллонит). По-видимому, наличие дефектных октаэдров и тетраэдров облегчает проникновение гидратированных протонов в структуру и растворение полуторных оксидов и оксида магния. Глины, в состав которых входит значительное количество минералов, обладающих расширяющейся структурной ячейкой, оказываются наиболее подходящими для того, чтобы их пористость можно было регулировать кислотной активацией.

При анализе результатов кислотной активации глины необходимо наряду с особенностями кристаллического строения учитывать и их химический состав. На первом этапе реакций взаимодействия компонентов глины с кислотой вынос октаэдрических ионов в раствор должен обязательно сопровождаться компенсацией возникающего отрицательного заряда решетки протонами, то есть фактически образованием групп Si-OH в структуре. Поскольку отдельные трехслойные пакеты минерала отличаются по своему химическому составу, то

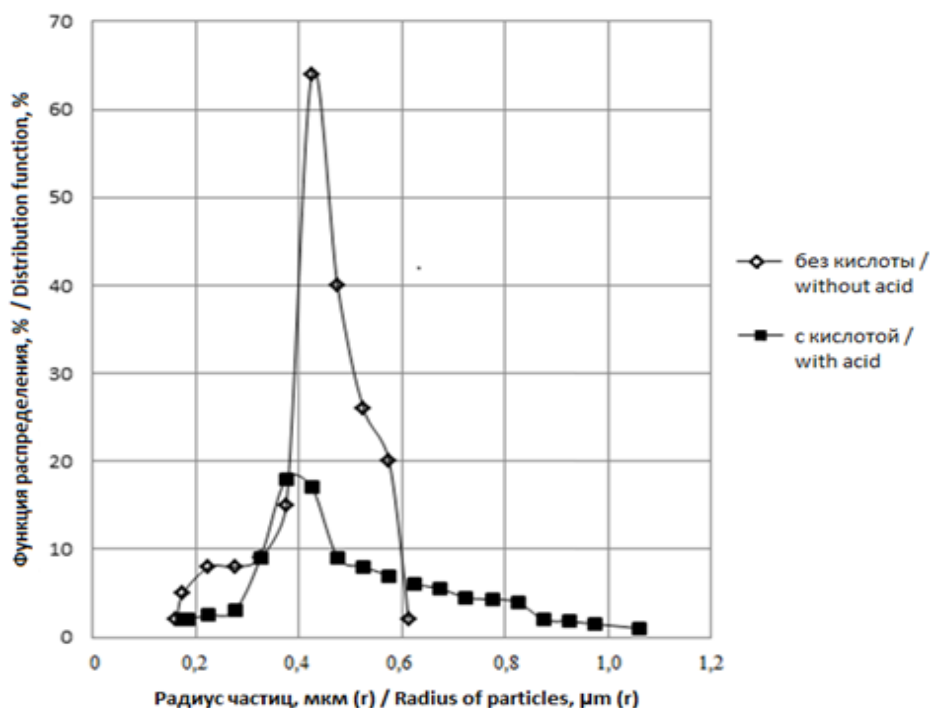


Рис. 6. Распределение частиц глины по размерам
Fig. 6. Size distribution of clay particles

вымывание на них растворимых оксидов идет крайне неравномерно и несомненно сопровождается процессами диспергации и «шелушения» частиц. Наиболее интенсивно реакция протекает на боковых гранях последних. Когда со временем она затрагивает глубинные октаэдрические кремнекислородные (точнее, кремнегидроксильные) сетки не могут более удерживаться у остова частички, обламываются и, полимеризуясь, образуют новую фазу – силикагель.

Анализ вида потенциальной кривой после кислотной активации глины удовлетворительно согласуется с приведенными рассуждениями о возможных реакциях (откликах) решетки под влиянием водного раствора, обогащенного гидратированными протонами и достаточно агрессивным хлор-ионом.

С учетом сложного состава глины, включающего минералы с жесткой и расширяющейся решеткой, очевидно, что наблюдаемые эффекты больше характерны для структур с расширяющейся

ячейкой. На данном этапе исследований можно лишь предполагать, что присутствие жестких решеток все-таки сказывается на обнаруженных эффектах. Суммарная энергия взаимодействия в рассчитанном диапазоне пленки между двумя поверхностями минеральных частиц практически соответствует классическому виду кривой в базовой теории коагуляции [1, 2]. В области отрицательных значений при малых величинах h угадывается наличие первого минимума, обеспечивающего устойчивость кристаллической решетки частиц. На малых расстояниях (порядка 5–10 нм) между глинистыми частицами действуют силы притяжения. Эти силы обеспечивают исходную микропористость системы и условия для адсорбции на активных центрах только внешней поверхности.

При расстояниях около 25–30 нм потенциальная кривая проходит максимум в положительной области энергий. Преобладание электростатического отталкивания здесь является следствием

нарушения регулярности решетки из-за частичного вымывания катионов обмена из межслоевых промежутков. После максимума силы отталкивания постепенно, но неуклонно снижаются, и это, очевидно, связано с проникновением гидратированных протонов в межслоевое пространство. Заполнение их приводит к существенному изменению соотношения сил притяжения и отталкивания, так как в межпакетное пространство внедряется один или несколько молекулярных слоев гидратированных протонов (при их размере в 0,135 нм в межслоевом пространстве, например, монтмориллонита, равном 0,9 нм, адсорбироваться может до 6 протонных слоев).

Происходит замена природного обменного комплекса минерала на другие неорганические катионы, в нашем случае – гидратированные протоны. Именно с такой частицей (протоном) образуются прочные координационные соединения на адсорбционных центрах минеральных частиц и кардинально изменяется природа адсорбционного обменного комплекса с образованием вторичного пористого пространства. Следствием этого является увеличение размеров минеральных частиц, обнаруживаемое на кривой распределения для кислоты (см. рис. 6).

Заключение

Для конкретного типа глины Слюдянского месторождения подтверждается общность некоторых закономерностей кислотной активации глинистых

минералов, связанная с тем, что процесс сопровождается вымыванием из остова кристаллической решетки ионов и образованием дефектов структуры. В раствор переходят многие элементы: калий, натрий, железо, кальций, магний, за счет этого относительное содержание кремнезема в образцах увеличивается. Дефекты кристаллической решетки с нарушением ее регулярности, переход поверхностного кремнезема в аморфное состояние обеспечивают изменение дисперсности системы и повышение пористости глинистых образцов.

Кристаллохимический анализ структуры минерала и термодинамическая оценка условий самопроизвольного протекания процесса позволили дать объяснение характера потенциальной кривой после активации глины. Экстремальный характер этой зависимости, по мнению авторов данной статьи, связан с изменениями силового поля на поверхности частиц в результате протекания комплекса физико-химических взаимодействий. Наиболее важными среди этих взаимодействий оказываются взаимодействия остоваобразующих ионов с компонентами среды.

Полученные результаты свидетельствуют, что глина Слюдянского месторождения относится преимущественно к минералам с расширяющейся структурной ячейкой. Для получения высокоэффективных минеральных сорбентов на базе глин такого типа целесообразно использование кислотной активации.

Библиографический список

1. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 2006. 444 с.
2. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. СПб. – М. – Краснодар: Лань, 2010. 416 с.
3. Помазкина О.И., Филатова Е.Г., Пожидаев Ю.Н. Адсорбция катионов

никеля (II) природными цеолитами // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2014. Т. 50. № 3. С. 262–267.

4. Помазкина О.И., Филатова Е.Г., Пожидаев Ю.Н. Адсорбция ионов меди (II) гейландитом кальция // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2015. Т. 51. № 4. С. 370–374.

5. Филатова Е.Г., Пожидаев Ю.Н., Помазкина О.И. Исследование адсорбции ионов тяжелых металлов природными алюмосиликатами // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2016. Т. 52. № 3. С. 285–289.
6. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. Киев: Наукова думка, 1975. 351 с.
7. Тарасевич Ю.И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
8. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / под ред. Г. Парфита, К. Рочестера. М.: Мир, 1986. 488 с.
9. Тальгамер Б.Л., Федорко В.П. [и др.]. Минерально-сырьевая база и перспективы развития горнодобывающей промышленности Иркутской области. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. 91 с.
10. Яковлева А.А., Во Дай Ту, Чыонг Суан Нам. Нерудные минералы Иркутской области как объект коллоидно-химических исследований // В мире научных открытий. 2010. № 4-15. С. 129–132.
11. Yakovleva A.A., Vo Dai Tu. Ionexchange of clay minerals from some deposits of Irkutsk region // Russian journal of applied chemistry. 2012. Vol. 85. № 3. P. 348–351.
12. Яковлева А.А., Во Дай Ту. Влияние электролитов на устойчивость суспензий на основе глины Слюдянского месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 6 (46). С. 209–213.
13. Яковлева А.А., Во Дай Ту. Энергия взаимодействия частиц глинистых минералов ряда месторождений Иркутской области // Физическая химия поверхностных явлений и адсорбции: труды II Всероссийского семинара. Иваново, 2011. С. 72–74.
14. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
15. Соколов В.Н. Формирование микроструктуры глинистых грунтов в ходе прогрессивного литогенеза // Инженерная геология: теория, практика, проблемы: сб. науч. тр. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 26–41.
16. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 568 с.
17. Бегунов А.И., Яковлев С.А., Яковлева А.А. Кинетические закономерности растворения магния в кислых средах // Известия вузов. Цветная металлургия. 2006. № 2. С. 9–12.
18. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2009. 461 с.
19. Нович Б.Е., Кольцев Т.А. Коллоидная устойчивость глины с использованием фотонной корреляционной спектроскопии // Глины и глинистые минералы. 1984. Т. 32. № 5. С. 400–406.

References

1. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2006, 444 p. (In Russian).
2. Fridrikhsberg D.A. *Kurs kolloidnoi khimii* [A course of colloid chemistry]. Saint Petersburg – Moscow – Krasnodar: Lan' Publ., 2010, 416 p. (In Russian).
3. Pomazkina O.I., Filatova E.G., Pozhidaev Yu.N. Adsorption of nickel (II) cations by natural zeolites. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces], 2014, vol. 50, no. 3, pp. 262–267. (In Russian).
4. Pomazkina O.I., Filatova E.G., Pozhidaev Yu.N. Adsorption of copper (II) ions by calcium heulandite. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces], 2015, vol. 51, no. 4, pp. 370–374. (In Russian).

5. Filatova E.G., Pozhidaev Yu.N., Pomazkina O.I. Investigation of adsorption of heavy metal ions by natural aluminosilicate. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces], 2016, vol. 52, no. 3, pp. 285–289. (In Russian).
6. Tarasevich Yu.I., Ovcharenko F.D. *Adsorbtsiya na glinistykh mineralakh* [Adsorption on clay minerals]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1975, 351 p. (In Russian).
7. Tarasevich Yu.I. *Stroenie i khimiya poverkhnosti sloistykh silikatov* [Structure and surface chemistry of layer silicates]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1988, 248 p. (In Russian).
8. Parfit G., Rochester K. *Adsorbtsiya iz rastvorov na poverkhnostyakh tverdykh tel* [Adsorption from solutions on the surfaces of solids]. Moscow: Mir Publ., 1986, 488 p. (In Russian).
9. Tal'gamer B.L., Fedorko V.P. *Mineral'no-syr'evaya baza i perspektivy razvitiya gornodobyvayushchei promyshlennosti Irkutskoi oblasti* [Mineral resources and development prospects of Irkutsk region mining industry]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2002, 91 p. (In Russian).
10. Yakovleva A.A., Vo Dai Tu, Chyong Suan Nam. *Nerudnye mineraly Irkutskoi oblasti kak ob"ekt kolloidno-khimicheskikh issledovaniy* [Non-metallic minerals of the Irkutsk region as an object of the colloid-chemical researches]. *V mire nauchnykh otkrytii* [In the World of Scientific Discoveries], 2010, no. 4-15, pp. 129–132. (In Russian).
11. Yakovleva A.A., Vo Dai Tu. Ionexchange of clay minerals from some deposits of Irkutsk region. *Russian journal of applied chemistry*, 2012, vol. 85, no. 3, pp. 348–351.
12. Yakovleva A.A., Vo Dai Tu. Effect of electrolytes on the stability of suspensions based on clay from Slyudyansky deposit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2010, no. 6 (46), pp. 209–213. (In Russian).
13. Yakovleva A.A., Vo Dai Tu. *Energiya vzaimodeistviya chastits glinistykh mineralov ryada mestorozhdenii Irkutskoi oblasti* [Interaction energy of particles of clay minerals of a number of fields in Irkutsk region]. *Fizicheskaya khimiya poverkhnostnykh yavlenii i adsorbtsii: trudy II Vserossiiskogo seminara* [Proceedings of II All-Russian Seminar "Physical Chemistry of Surface Phenomena and Adsorption"]. Ivanovo, 2011, pp. 72–74. (In Russian).
14. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumyantseva N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay rocks]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 211 p. (In Russian).
15. Sokolov V.N. *Formirovanie mikrostruktury glinistykh gruntov v khode progressivnogo litogeneza* [Clay soil microstructure formation under progressive lithogenesis]. *Inzhenernaya geologiya: teoriya, praktika, problemy* [Engineering Geology: Theory, Practice, Problems]. Moscow: Moscow State University Publ., 1993, pp. 26–41. (In Russian).
16. Roldugin V.I. *Fizikokhimiya poverkhnosti* [Physical chemistry of surface]. Dolgoprudnyi: Izdatel'skii Dom "Intel'ekt" Publ., 2008, 568 p. (In Russian).
17. Begunov A.I., Yakovlev S.A., Yakovleva A.A. *Kineticheskie zakonomernosti ras-tvoreniya magniya v kislykh sredakh* [Kinetic regularities of magnesium dissolving in acidic media]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Russian Journal of Non-Ferrous Metals], 2006, no. 2, pp. 9–12. (In Russian).
18. Prigozhin I., Kondepudi D. *Sovremennaya termodinamika* [Modern thermodynamics]. Moscow: Mir Publ., 2009, 461 p. (In Russian).
19. Novich B.E., Kol'tsev T.A. *Kolloidnaya ustoichivost' gliny s ispol'zovaniem fotonnoi korrelyatsionnoi spektroskopii* [Colloidal stability of clays using photon correlation spectroscopy]. *Gliny i glinistye mineraly* [Clays and clay minerals], 1984, vol. 32, no. 5, pp. 400–406. (In Russian).

Критерии авторства

Яковлева А.А., Мальцева Г.Д. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Yakovleva A.A., Maltseva G.D. 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/10.21285/2541-9455-2018-41-1-115-125>

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО И ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗОВ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

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

^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.

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

РЕЗЮМЕ. Цель. Оценка возможностей регрессионного и дисперсионного анализов при количественной интерпретации гравитационных аномалий в решении обратной задачи гравиразведки в сложных геологических условиях. **Методы.** Рассматриваются возможности использования факторного анализа и сингулярного разложения матриц при инверсии гравитационного поля Уланбаатарской впадины (Монголия), имеющей сложную геологическую структуру. **Результаты.** Получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений исследуемой структуры и данные о морфологических особенностях погруженной части кристаллического фундамента. Уланбаатарская впадина имеет сложное блоковое строение. Поперечным поднятием фундамента она разделяется на две котловины: западную и центральную. В западной части, в зоне тектонических нарушений, выделенная котловина имеет форму овала с размерами 3×6 км с толщиной линзы осадков 100–120 м. Максимальная мощность кайнозойских отложений центральной котловины составляет 130–160 м. Полученные количественные оценки подтверждаются результатами математического моделирования при инверсии гравитационного поля исследуемой впадины с помощью аналитических методов. **Выводы.** Применение дисперсионного и регрессионного анализов при интерпретации гравитационного поля в сложных геологических условиях позволило оценить мощность рыхлых отложений и охарактеризовать морфологию поверхности фундамента Уланбаатарской впадины. Результаты инверсии поля силы тяжести с помощью рассмотренного математического аппарата совпадают с результатами вычислений аналитическими методами при решении одномерной обратной задачи для контактной поверхности (для плоского слоя), что подтверждает эффективность предложенного авторами метода интерпретации гравитационных аномалий.

Ключевые слова: количественная интерпретация гравитационного поля, факторный анализ и сингулярное разложение матриц, Уланбаатарская впадина.

Информация о статье. Дата поступления 4 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 13 декабря 2017 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. 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. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-115-125

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

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

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

Evgeny Kh. Turutanov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Head of the Laboratory of Complex Geophysics, tel.: (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

^вБуянтогтох 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

APPLICATION OF REGRESSION AND VARIANCE ANALYSES FOR GRAVIMETRY DATA INTERPRETATION

© V.S. Kanaikin, E.Kh. Turutanov, B. Buyantogtokh

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation
Institute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Institute for Astronomy and Geophysics,
42 J. Lhagaasurengiin, Ulaanbaator 13343, Mongolia

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to evaluate the possibilities of regression and variance analyses in the quantitative interpretation of gravity anomalies when solving gravity inversion problem in complex geological conditions. **Methods.** The paper considers the possibilities to use a factor analysis and singular matrix decomposition under the gravity field inversion of the Ulaanbaator depression (Mongolia), which is characterized with a complex geological structure. **Results.** We have obtained the quantitative characteristics of the loose sediment thickness in the structure under investigation and the data on morphological features of the immersed part of the crystalline basement. The Ulaanbaator depression has a complicated block structure. The transverse uplift of the foundation divides it into two basins: Western and Central. In the Western part, which is the area of tectonic disturbances, the identified basin is oval in shape with the dimensions of 3×6 km and the thickness of the deposition lens of 100-120 meters. The maximum thickness of Cenozoic deposits in the Central basin is 130-160m. Obtained quantitative assessments are confirmed by the results of mathematical modeling under gravity field inversion of the studied basin with the help of analytical methods. **Conclusions.** The thickness of loose deposits has been estimated and the surface morphology of the Ulaanbaator depression basement has been described by means of regression and variance analyses under gravity field interpretation in complex geological conditions. The results of gravity field inversion by means of the considered mathematical tools coincide with the calculation results of the analytical methods when solving a one-dimensional inverse problem for a contact surface (for a flat layer), which confirms the efficiency of the proposed interpretation method of gravity anomalies.

Keywords: *quantitative interpretation of a gravity field, factor analysis and singular matrix decomposition, Ulaanbaator depression*

Article info. Received 4 December 2017; accepted for publication 13 December 2017; available online 30 March 2018.

For citation. Kanaikin V.S., Turutanov E.H., 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). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-115-125

Введение

Количественная интерпретация гравитационных данных предполагает широкое использование различных способов обработки исходных материалов. В частности, при интерпретации потенциальных геофизических полей достаточно часто применяются методы регрессионного и дисперсионного анализов. Использование этих методов для количественной интерпретации гравитационных данных зависит от сложности геологической ситуации изучаемого района, следовательно, и характера геофизического поля

[1, 2]. Поэтому на основе материалов, изложенных в статье [3], в рамках данной публикации рассматриваются возможности использования аппарата дисперсионного и регрессионного анализов для инверсии гравитационного поля Уланбаатарской впадины с целью оценки мощности заполняющих ее осадочных отложений. Впадина имеет сложное геологическое строение: ее структура осложнена наличием двух мульдообразных котловин, разделенных поперечным поднятием фундамента.

Средняя плотность рыхлых отложений принята по данным результатов многочисленных денситометрических измерений и составляет 2100 кг/м^3 [3].

Вмещающие впадину породы Хэнтэйской серии представлены в основном нижнекарбовыми песчаниками и алевролитами. Величина плотности коренных пород принимается равной 2700 кг/м^3 .

Материалы и методы исследования

Схема исходного гравитационного поля Уланбаатарской впадины приведена на рис. 1. На основе анализа харак-

тера гравитационного поля можно отметить, что форма поля достаточно сложная: фиксируются как минимум две аномалии силы тяжести: одна – в западной, вторая – в центральной части впадины. Наблюдаемая заливообразная аномалия в западной части располагается на площади сплошного развития речных отложений. Наиболее интенсивная аномалия силы тяжести четырехугольной формы расположена в центральной части впадины [3]. Максимальная амплитуда перепада гравитационного поля на данном участке составляет 14 мГал. Выделение локальных аномалий в

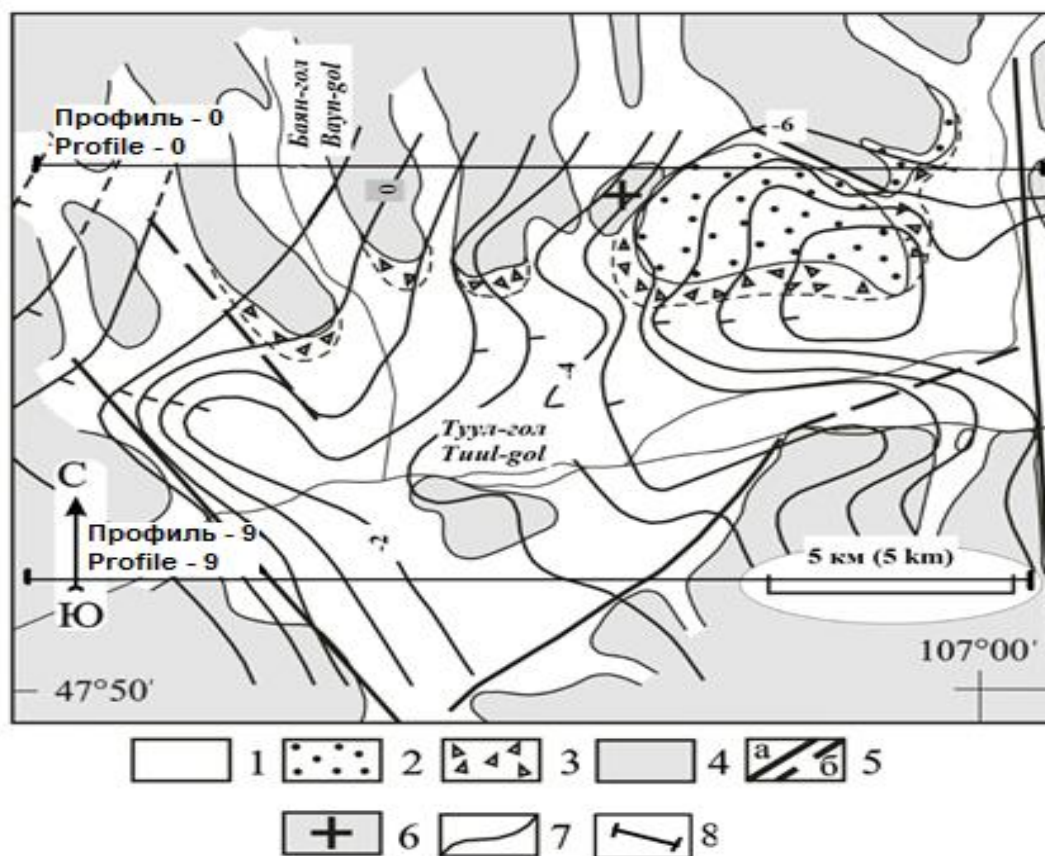


Рис. 1. Схема аномалий Буге Уланбаатарской впадины (в относительном уровне, сечение через 1 мГал):

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – изоаномалы силы тяжести, мГал;
8 – интерпретационные профили

Fig. 1. Diagram of the Bouguer anomalies of the Ulaanbaatar depression (at a relative level, section in 1 mGal):

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged;
6 – Paleozoic granites; 7 – gravity isoanomalies, mGal; 8 – interpretation profiles

чистом виде с целью их дальнейшей количественной интерпретации достаточно сложно, для этого необходимо рассчитать региональный фон гравитационного поля и ввести соответствующие поправки в исходное поле.

Для расчета регионального поля и выделения локальных аномалий использован аппарат дисперсионного анализа, а именно метод главных компонент [4, 5]. Как факторный, так и компонентный анализ базируется на изучении внутренней структуры ковариационной матрицы исходных данных. Это изучение включает: нахождение собственных значений и собственных векторов матрицы; вычисление линейных комбинаций исходных величин с собственными векторами; оценку числа основных, независимых векторов; физическое или геологическое истолкование факторов и главных компонент.

Как показали специальные исследования [5], наибольший интерес представляют две первые главные компоненты, именно они характеризуют структуру и наибольшую дисперсию (энергию) анализируемого поля. Принято считать, что первая главная компонента при обработке гравитационного поля, как правило, связана с региональной составляющей анализируемого поля.

Для реализации этого этапа исходное гравитационное поле было оцифровано и представлено для дальнейшей обработки в виде двумерного массива ΔG размерностью $n \times m$, где $n = 10$ профилей, $m = 64$ пикета. На основе этой матрицы ΔG рассчитывается ковариационная матрица K размерностью $n \times n$. Анализ ковариационной матрицы позволяет вычислить главные независимые факторы и далее рассчитать значение и характер регионального фона $\Delta G_{рег}$. Методика подобной обработки описывается в источниках [4–6].

Результаты расчета регионального фона для первой главной компоненты показаны на рис. 2. Разность между исход-

ным полем и региональным фоном дает локальную аномалию: $\Delta G_{лок} = \Delta G - \Delta G_{рег}$ (рис. 3). Форма поля, соответствующего региональному фону, носит характер, близкий к линейному. Об этом свидетельствуют и вид графиков фоновых значений поля по второму и пятому интерпретационному профилю (рис. 4). Характер регионального фона и локальных аномалий не противоречит геологическому строению изучаемого участка, что косвенно подтверждает возможность использования факторного анализа.

На схеме (см. рис. 3) отчетливо видно наличие двух локальных аномалий, поэтому задачей следующего этапа обработки является решение обратной задачи с целью определения мощности кайнозойских осадков этих аномалеобразующих тел.

Решение обратной задачи для этих аномалий осуществлено с использованием регрессионных методов [7, 8]. Количественные вычисления выполнены для всей площади исследования, т. е. по всем 10 профилям. Более подробно рассмотрим расчеты по двум профилям: первому профилю, проходящему через центральную аномальную зону, и пятому профилю, проходящему через западную аномалию. Длина каждого профиля – около 20000 м.

На базе методики интерпретации, основанной на применении регрессионного анализа, для каждого профиля сформированы линейные математические модели в виде системы уравнений $\Delta G_{лок} \approx B \cdot \bar{a}$, где B – матрица плана размерностью $m \times k$, $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ – вектор-столбец определяемых коэффициентов (в нашем случае это значение избыточных плотностей прямоугольных призм), $m = 64$ – количество пикетов на профиле; k – число прямоугольных призм, которыми аппроксимирован изучаемый геологический разрез. Этот параметр может изменять свое численное значение, но не может быть больше m [6].

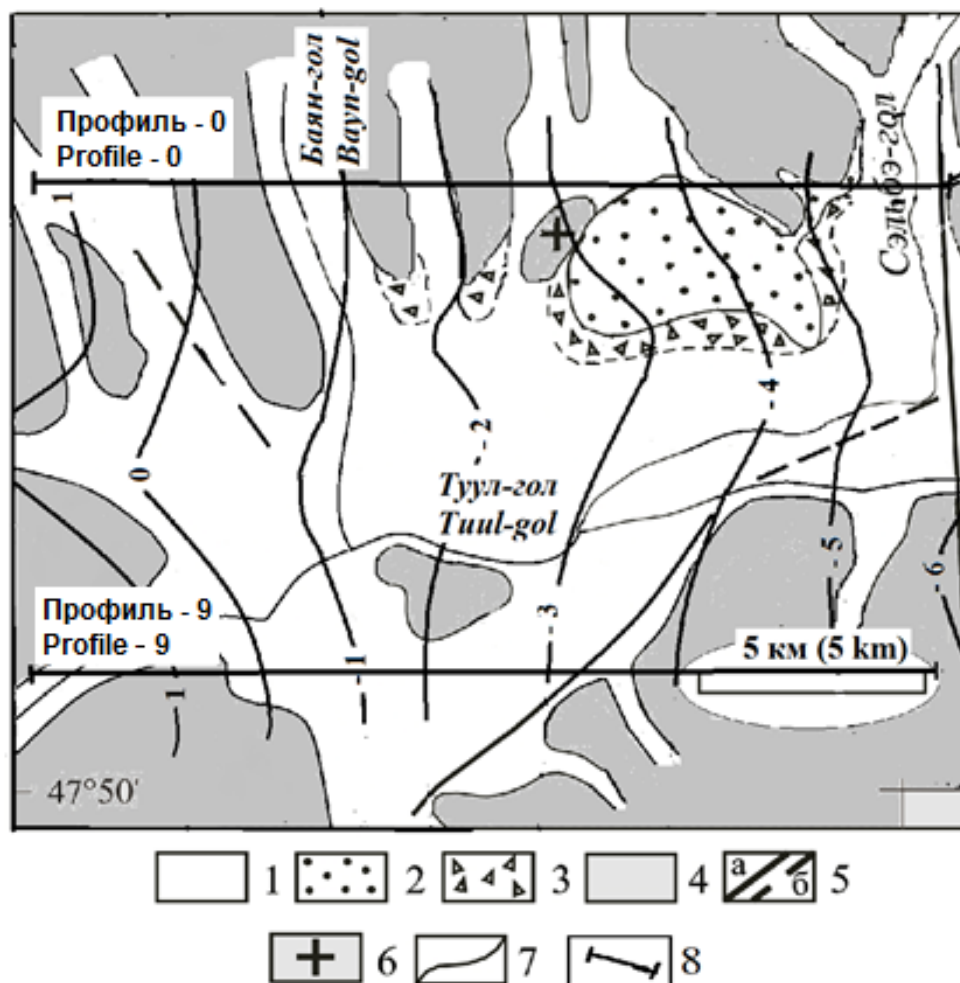


Рис. 2. Схема регионального фона Уланбаатарской впадины (в относительном уровне):

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – изоаномалы силы тяжести регионального фона, мГал,
8 – интерпретационные профили

Fig. 2. Diagram of the regional background of the Ulaanbaatar basin (at a relative level):

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged; 6 – Paleozoic granites;
7 – isoanomaly of gravity of the regional background, mGal, 8 – interpretation profiles

Наиболее распространенный способ определения коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ основан на методе наименьших квадратов [8, 9], но он требует обращение матрицы B . Как известно, эта процедура очень чувствительна к ошибкам вычислений и измерений входных и выходных переменных. Поэтому был использован более надежный алгоритм вычисления искомых коэф-

фициентов, основанный на применении сингулярного разложения матрицы [6, 7]. Сингулярное разложение позволяет выбирать решения с учетом реальной точности вычислений и исходных данных путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам σ , значение которых меньше заданной точности наблюдений гравитационного поля данной съемки τ . Эта операция

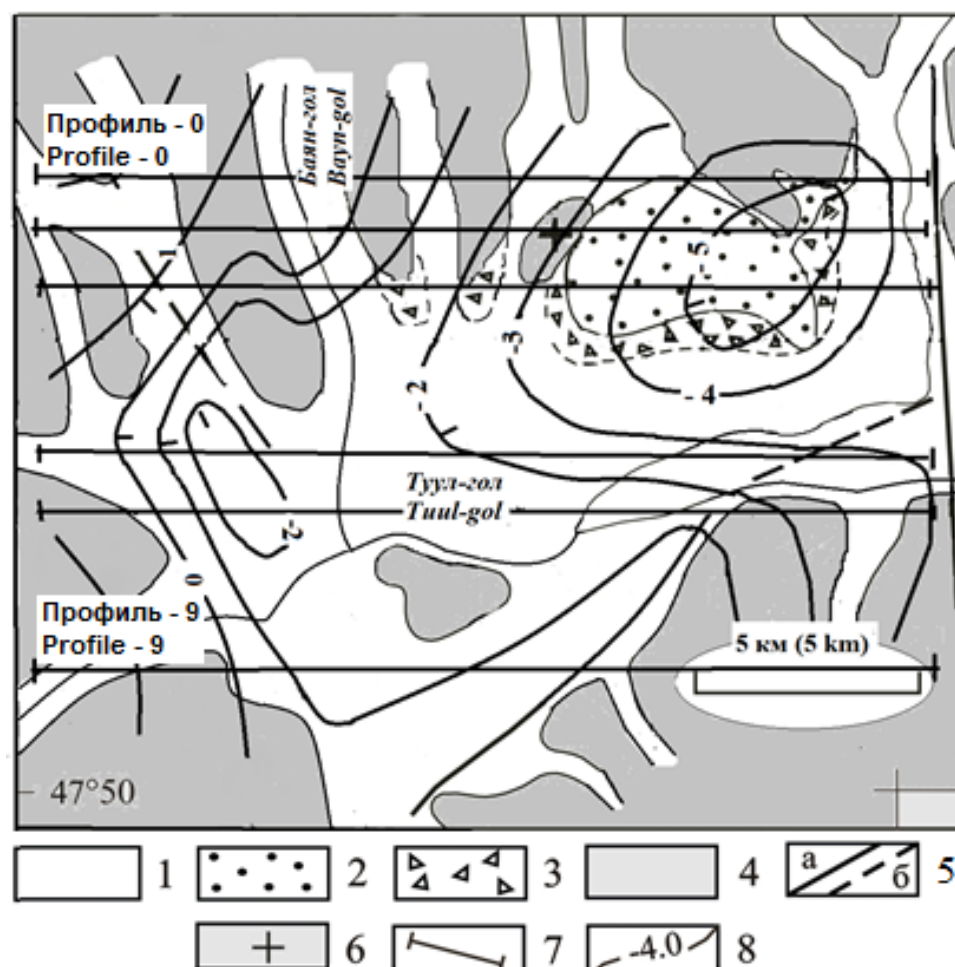


Рис. 3. Схема локальных аномалий Уланбаатарской впадины (в относительном уровне):

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – интерпретационные профили;
8 – локальные аномалии силы тяжести $\Delta G_{\text{лок}}$, мГал

Fig. 3. Diagram of local anomalies of the Ulaanbaatar depression (at a relative level):

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged; 6 – Paleozoic granites;
7 – interpretation profiles; 8 – local anomalies of gravity $\Delta G_{\text{лок}}$, mGal

дает возможность более достоверного определения коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ благодаря уменьшению числа обусловленности матрицы B . При этом, как правило, невязка между наблюдаемым и «модельным» гравитационным полем возрастает, но надежность получающегося регуляризованного решения (избыточные плотности призм) с избытком оправдывает эту потерю [6, 7].

Решение линейной обратной задачи гравиразведки заключается в определении морфологии геологического разреза. Для этого необходимо аппроксимировать изучаемый геологический разрез набором правильных геометрических тел. Геологическая структура в районе первого профиля была представлена в виде 32 горизонтальных прямоугольных призм ($k = 32$), что соответствует четырем

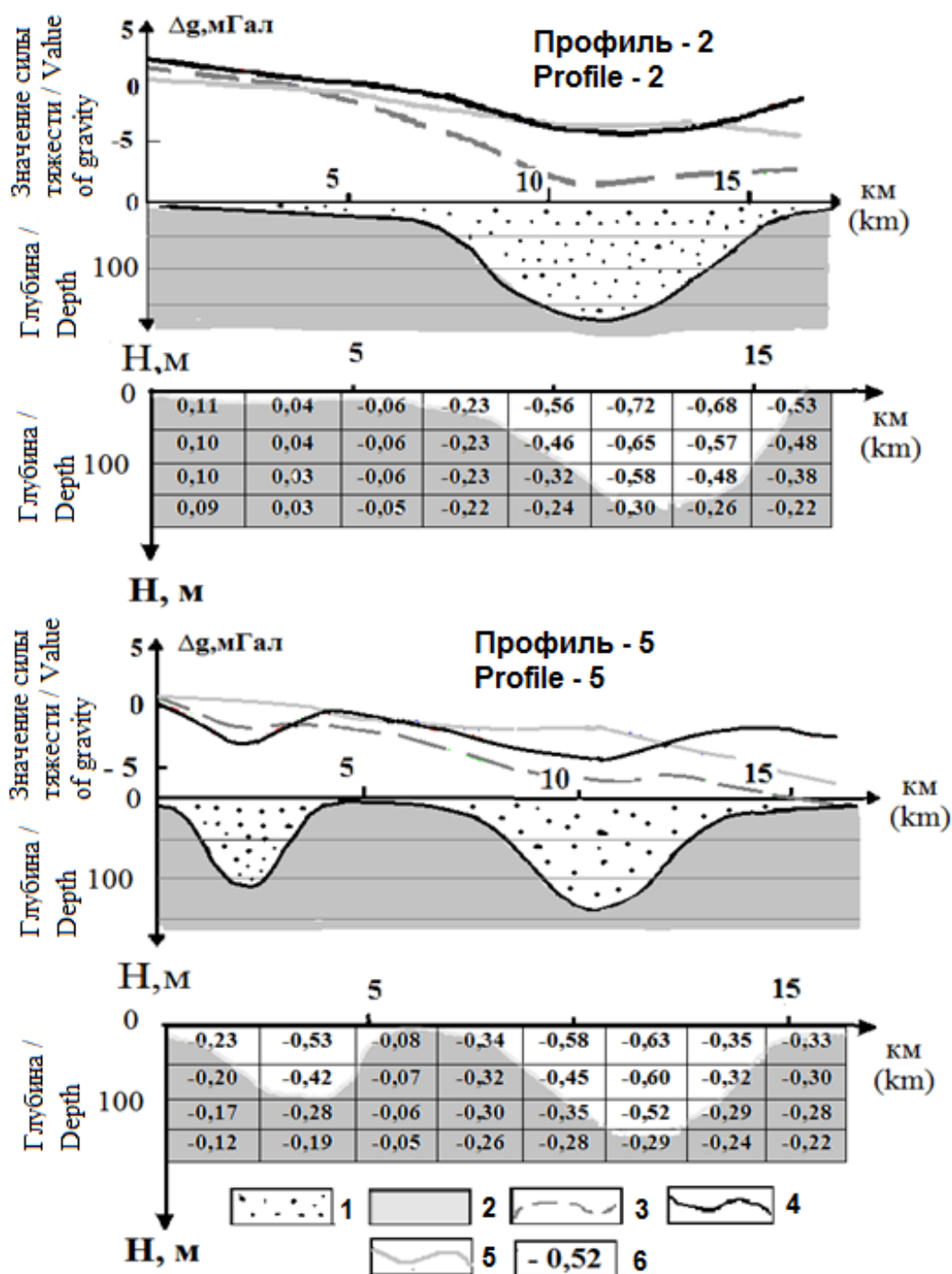


Рис. 4. Интерпретационные разрезы Уланбаатарской впадины:

1 – осадочные отложения; 2 – вмещающие породы; 3 – графики силы тяжести исходного поля ΔG в редукции Буге, мГал; 4 – графики локальных аномалий силы тяжести; 5 – графики регионального фона $\Delta G_{рег}$; 6 – избыточные плотности прямоугольных призм, г/см³

Fig. 4. Interpretation sections of the Ulaanbaatar depression:

1 – sedimentary deposits; 2 – host rocks; 3 – gravity graphs of the initial field ΔG in the Bouguer reduction, mGal; 4 – graphs of local gravity anomalies; 5 – graphs of the regional background $\Delta G_{рег}$; 6 – excess densities of rectangular prisms, g/cm³

слоям по восемь призм в каждом слое (см. рис. 4) [7, 9]. Размеры каждой призмы приняты следующие: горизонтальная мощность – 2500 м, вертикальная – 50 м. Для 64 точек профиля ($m = 64$) и 32 базисных функций ($k = 32$) была рассчитана матрица плана B . Каждый элемент $b_{m,k}$ этой матрицы выражает эффект k -й прямоугольной призмы ($k = 1, \dots, 32$) в m -й точке профиля ($m = 1, \dots, 64$), причем плотность такой призмы принята равной 1. Применение дополнительного элемента $b_{m,33} = 1$ позволяет включить в число определяемых параметров не только избыточную плотность призм, но и неизвестный уровень «остаточного» нормального поля по интерпретируемому профилю, другими словами, этот элемент позволяет учитывать различные ошибки, связанные с выбором интерпретационной модели, точностью исходных данных и вычислительных процедур. Численное значение этого элемента должно быть близким к точности гравиметрической съемки среднего масштаба.

Расчеты выполнены с помощью математического пакета MathCad с использованием подпрограмм сингулярного разложения матриц SVD. На примере первого интерпретационного профиля рассматриваемая матрица плана B характеризуется большим числом обусловленности $\sigma_1 = 12,83$; $\sigma_{32} = 0,0000179$. Приемлемое решение получено при значении $\sigma > \sigma_1 \cdot \tau = 12,83 \cdot 0,05 = 0,64$, что соответствует 5 % точности полевых работ и использованию первых восьми сингулярных чисел [6, 7]. В этом случае избыточные плотности (коэффициенты при 1–32-й базисных функциях) близки к отрицательной избыточной плотности осадочных отложений, равной $-0,4 \dots -0,6$ г/см³ (см. рис. 4). Коэффициент при 33-й базисной функции равен «остаточному фоновому» значению гравитационного поля и составляет $-0,54$ мГал, что близко к точности гравиметрической съемки данного масштаба.

Отметим, что изменение числа призм в слое до 16 с горизонтальной мощностью по 1250 м не приводит к значительному изменению решения. Увеличение количества слоев, т. е. увеличение мощности аномалеобразующего объекта, приводит к уменьшению избыточной плотности призм. Поэтому, изменяя число и геометрические размеры призм, можно аппроксимировать различные по объему геологические объекты. Средняя плотность рыхлых отложений принята по данным результатов многочисленных денситометрических измерений [3] и составляет 2100 кг/м³. Величина плотности коренных пород принимается по источнику [3] и равна 2700 кг/м³.

Аналогичные вычисления выполнены по пятому интерпретационному профилю. Исходя из того, что амплитуда западной аномалии значительно меньше амплитуды центральной, ее интерпретационная модель в западной части профиля имеет вертикальную мощность не 200 м (четыре слоя призм), а всего – 150 м (три слоя). Это позволяет увеличить избыточную плотность призм, составляющих аномалеобразующее тело, до значений $-0,4 \dots -0,6$ г/см³ (см. рис. 4).

Результаты интерпретации гравиметрических данных

Результаты интерпретации гравитационных аномалий отражены на схеме регионального фона Уланбаатарской впадины (см. рис. 2), схеме локальных аномалий (см. рис. 3), на интерпретационных разрезах (см. рис. 4) и схеме изопахит осадочных отложений (рис. 5).

На основе анализа схемы регионального фона Уланбаатарской впадины можно отметить, что характер фоновое гравитационное поле исследуемого участка близок к линейному. Вычитая из исходного поля силы тяжести региональный фон, можно получить локальные гравитационные аномалии. Интенсивность локальных отрицательных аномалий для исследуемого участка доходит до -7 мГал,

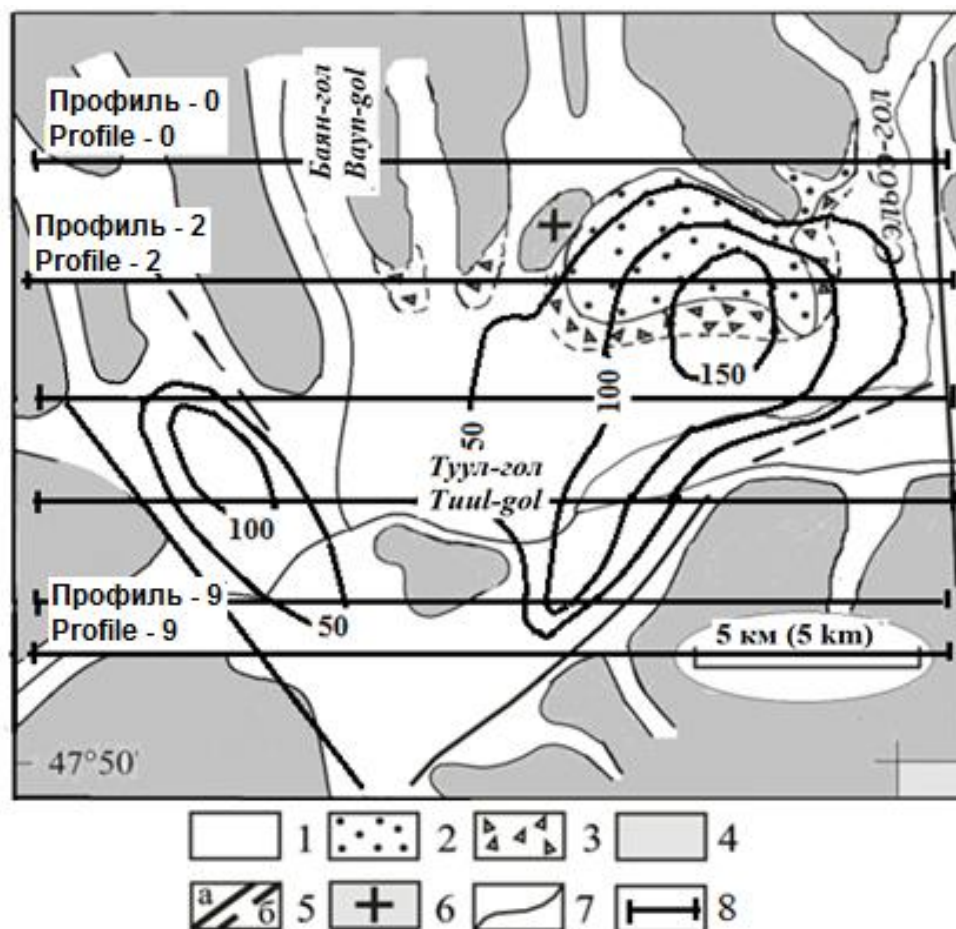


Рис. 5. Схема изопакит осадочных отложений Уланбаатарской впадины:

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – изопакиты осадочных отложений, м;
8 – интерпретационные профили

Fig. 5. Diagram of Ulaanbaatar depression sedimentary deposit isopachytes:

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged; 6 – Paleozoic granites;
7 – isopachytes of sedimentary deposits, m; 8 – interpretation profiles

что полностью соответствует оценкам, проведенным в работе [3]. В целом характер регионального гравитационного фона и локальных аномалий по своей интенсивности и по морфологии не противоречит геологическому строению изучаемого участка, что косвенно подтверждает возможность использования факторного анализа для выделения регионального фона с целью решения задач структурной геологии.

Применение факторного анализа не исключает возможности некоторых

искажений в расчете регионального фона, а следовательно, и выделяемых локальных гравитационных минимумов, что может быть связано с ограниченностью участка исследований, то есть с отсутствием выхода в «нормальное» поле, присутствием других локальных аномалий на границах данной площади и т. д.

Решение обратной задачи гравиразведки для локальных аномалий Уланбаатарской впадины осуществлялось методами регрессионного анализа, точнее сингулярного разложения матриц. Этот

подход требует аппроксимации изучаемого геологического разреза набором правильных геометрических тел, в нашем случае набором горизонтальных прямоугольных призм. Необходимо отметить, что использование аппарата сингулярного разложения матриц позволяет осуществлять выбор «регуляризованных» решений путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам, значение которых меньше заданной точности полевых наблюдений [6].

В результате решения линейной обратной задачи гравirazведки были получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений этой структуры и данные о морфологических особенностях погруженной части кристаллического фундамента. Результаты интерпретации, приведенные на геофизических разрезах (см. рис. 4) и схеме изопакит осадков (см. рис. 5), свидетельствуют о том, что Уланбаатарская впадина имеет сложное геологическое строение. Фундамент ее разбит на многочисленные блоки, одним из которых впадина разделена на две котловины: западную и центральную (см. рис. 5). В западной части, в зоне тектонических нарушений, выделяется котловина в форме овала

размерами 3×6 км с толщиной осадков 100–120 м. Большая ось ее ориентирована в северо-западном направлении вдоль западного борта впадины. Максимальная мощность кайнозойских отложений центральной котловины составляет 130–160 м. Длинная ось этой котловины составляет 12 км.

Выводы

Применение дисперсионного и регрессионного анализов при интерпретации гравитационного поля в сложных геологических условиях позволило достоверно оценить мощность рыхлых отложений и охарактеризовать морфологию поверхности фундамента Уланбаатарской впадины. Установлено, что фундамент впадины имеет блоковое строение и осложнен мульдообразными прогибами. Геометрические и физические характеристики осадочной призмы хорошо совпадают с аналогичными характеристиками, полученными с использованием других методик интерпретации [3].

В связи с этим можно сделать вывод о том, что применение метода главных компонент и сингулярного разложения матриц при интерпретации гравитационного поля для сложных геологических условий возможно и достаточно эффективно.

Библиографический список

1. Яновская Т.Б., Прохорова Л.Н. Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 214 с.
2. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: Изд-во РГГРУ, 2009. 230 с.
3. Арвисбаатар Н., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б., Цэндсүрэн Д. Глубинное строение Уланбаатарской впадины по гравиметрическим данным (Монголия) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 5. С. 53–61.
4. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 600 с.
5. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 337 с.
6. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математического вычисления / пер. с англ. М.: Мир, 1980. 280 с.
7. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.

8. Старостенко В.Н. Устойчивые численные методы решения обратных задач. М.: Недра, 1988. 250 с.

9. Успенский Д.Г. Гравиразведка. Л.: Недра, 1968. 230 с.

References

1. Yanovskaya T.B., Prokhorova L.N. *Obratnye zadachi geofiziki* [Inverse problems of geophysics]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University Publ., 2004, 214 p. (In Russian).

2. Blokh Yu.I. *Interpretatsiya gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii* [Interpretation of gravity and magnetic anomalies]. Moscow: Russian State Geological Prospecting University Publ., 2009, 230 p. (In Russian).

3. Arvisbaatar N., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B., Tsendsuren D. Deep structure of Ulanbaatasky depression by gravimetric data (Mongolia). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 5, pp. 53–61. (In Russian).

4. Devis Dzh. Statistics and data analysis in geology. 1977, 600 p. (Russ. ed.: Devis Dzh. *Statistika i analiz geologicheskikh dannyykh*. Moscow: Mir Publ., 600 p.).

5. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii* [Theoretical principles of geophysical information processing]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 337 p. (In Russian).

6. Forsythe J., Malcolm M., Moler K. Machine methods of mathematical calculations, 1980, 280 p. (Russ. ed.: *Mashinnye metody matematicheskii vychislenii*. Moscow: Mir Publ., 1980, 280 p.).

7. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modelirovanie v razvedochnoi geofizike* [Modelling in exploration geophysics]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 192 p. (In Russian).

8. Starostenko V.N. *Ustoichivye chislennyye metody resheniya obratnykh zadach* [Stable numeric methods for solving inverse problems]. Moscow: Nedra Publ., 1988, 250 p. (In Russian).

9. Uspenskii D.G. *Gravirazvedka* [Gravity prospecting]. Leningrad: Nedra Publ., 1968, 230 p. (In Russian).

Критерии авторства

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

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.

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 622.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ КОМПЛЕКСНЫХ ЗОЛОТОПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

© В.П. Мязин^a, С.А. Литвинцев^b

^{a,b}Забайкальский государственный университет,
672039, Российская Федерация, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30.

РЕЗЮМЕ. Цель. Разработка эффективной технологии переработки комплексных полиметаллических руд на основе усовершенствования процесса гравитационного выделения золота в головке технологической линии. **Методы.** При выполнении данной работы использованы аналитические и экспериментальные методы исследований: химический и пробирный методы анализа исходного сырья и продуктов обогащения, гранулометрический анализ, экспериментальные исследования на гравитационном лабораторном и промышленном оборудовании, методы статистической обработки экспериментальных данных и математического моделирования. **Результаты.** По результатам исследований установлено, что при прямом гравитационном обогащении исследуемой руды получены достаточно хорошие показатели по уровню извлечения ценных компонентов. Извлечение золота в черновой гравитационный концентрат колеблется в пределах 27,57–36,48 %, серебра – 14,79–22 %, свинца – 14,66–7,94 %. Следует отметить, что наиболее высокое извлечение золота было достигнуто при обогащении руды на отсадочной машине с модернизированной конструкцией камеры. На основании проведенных исследований установлена принципиальная возможность повышения извлечения ценных компонентов в концентрат гравитации: золота – до 3 %, серебра – до 7,5 %, свинца – до 3,8 %. Ожидаемый экономический эффект от внедрения предлагаемых технических решений составит 129562579 рублей.

Ключевые слова: гравитационное обогащение, отсадочная машина, извлечение, ценный компонент, золото, серебро, свинец, концентрат.

Информация о статье. Дата поступления 30 января 2018 г.; дата принятия к печати 5 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Мязин В.П., Литвинцев С.А. Повышение эффективности гравитационного извлечения золота из комплексных золотополиметаллических руд // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 126–136. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136

IMPROVING EFFICIENCY OF GOLD RECOVERY FROM COMPLEX GOLD-POLYMETALLIC ORES BY GRAVITY SEPARATION

© V.P. Myazin, S.A. Litvintsev

Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, 672039, Russian Federation

^aМязин Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья, e-mail: myazinvpchita@mail.ru

Viktor P. Myazin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mineral Processing and Secondary Raw Materials, e-mail: myazinvpchita@mail.ru

^bЛитвинцев Сергей Андреевич, аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья, e-mail: sergeylitvincev84@yandex.ru

Sergey A. Litvintsev, Postgraduate student of the Department of Mineral Processing and Secondary Raw Materials, e-mail: sergeylitvincev84@yandex.ru

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is development of an efficient technology for complex polymetallic ore processing based on the improved gold gravity separation in the head of the production train. **Methods.** The following analytical and experimental methods are used: chemical and fire assay analyses of the feed and concentrate, size fraction analysis, bench scale and pilot plant gravity tests, statistical analysis of experimental data and mathematical modeling. **Results.** The study results show that the direct gravity concentration provides relatively good recovery of valuable components. The recovery of gold to the primary gravity concentrate varies from 27.57 to 36.48 %, silver from 14.79 to 22 % and lead from 14.66 to 27.94 %. The highest recovery of gold was achieved under ore dressing using a modernized jigging box. The conducted studies show that there is a possibility in principle to increase the recovery of valuable component to the gravitation concentrate. In this case the recovery of gold to the gravity concentrate may be increased by 3 %, silver by 7.5 %, lead by 3.8 %. The expected economic effect from the introduction of the proposed technical solution will estimate RUB129,562,579.

Keywords: gravity concentration, jig, recovery, valuable component, gold, silver, lead, concentrate

Article info. Received 30 January 2018; accepted for publication 5 March 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Myazin V.P., Litvintsev S.A. Improving efficiency of gold recovery from complex gold-polymetallic ores by gravity separation. *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. 126–136. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136

Введение

Полиметаллические золотосодержащие руды являются весьма сложным объектом обогащения, помимо основных металлов они содержат золото, серебро и другие элементы, существенно повышающие товарную стоимость руды. Поэтому основной задачей обогащения является максимальное извлечение всех ценных компонентов, входящих в состав руд.

Технология извлечения золота из полиметаллических руд осложняется тем, что условия, оптимальные для извлечения минералов цветных металлов, не всегда бывают благоприятными для извлечения золота. Например, необходимое для полного раскрытия ценных компонентов более тонкое измельчение руды или продуктов обогащения приводит к значительным потерям свободного золота с отвальными хвостами и технологическими продуктами вследствие его переизмельчения.

Решение задач обогащения полиметаллических руд также затрудняется широким диапазоном колебаний содержания полезных компонентов в рудах, неравномерной и тонкой вкрапленностью ценных компонентов, наличием в рудах

большого количества глины и первичных шламов. При этом золото трудно извлекается традиционными гравитационными методами с использованием центробежных концентраторов, отсадочных машин, винтовых сепараторов и короткоконусных гидроциклонов. В этих условиях разработка и усовершенствование технологий и аппаратов для выделения гравитационно извлекаемого золота из комплексных полиметаллических руд является одной из актуальных задач.

Объектом исследования в данной работе являются полиметаллические руды Ново-Широкинского месторождения. Технологические исследования были выполнены на пробе текущей добычи.

Методы исследований

При выполнении работы использованы аналитические и экспериментальные методы исследований: химический и пробирный методы анализа исходного сырья и продуктов обогащения, гранулометрический анализ, экспериментальные исследования на гравитационном лабораторном и промышленном оборудовании, методы статистической обработки экспериментальных данных и математического моделирования.

Результаты

Методика проведения исследований включала изучение вещественного состава, оценку раскрываемости основных рудных минералов и целесообразности применения различных гравитационных аппаратов для выделения гравитационно извлекаемого золота из руды.

По данным минералогических исследований, исследуемая проба руды более чем на 90 % представлена породообразующими минералами. Основными из них являются кварц (41,1 %), доломит (22,3 %), мусковит и иллит (12,4 %), ортоклаз (7,9 %), в меньшем количестве присутствуют альбит, каолинит и хлорит. Сульфидная минерализация представлена пиритом, сфалеритом, галенитом, тетраэдритом и буланжеритом [1].

Золото отмечается в виде как свободных частиц, так и сростков с сульфидами и нерудными минералами. Размер золотин варьирует от 10 до 200 мкм. Исследуемая руда характеризуется неравномерным распределением золота по гранулометрическим фракциям, наибольшее количество золота содержится в классах -2,0...+1,0 мм (54,45 %) и -1,0...+0,5 мм (24,69 %).

По фазовому составу основная часть золота (30 %) находится в свободной (гравитируемой) форме и в открытых сростках (45 %).

Для предварительной оценки гравитационной обогатимости исследуемой пробы руды был выполнен гравитационный анализ, по результатам которого были установлены прогнозные технологические показатели обогащения и проанализирована раскрываемость ценных компонентов в исходной руде.

Исследования по обогащению руды проводились на стандартном лабораторном оборудовании, винтовом сепараторе СВ-300 и центробежном концентраторе Knelson MD-3.

Исследования по отсадке были выполнены на специально разработанной

лабораторной установке. Установка сконструирована на базе лабораторной диафрагмовой отсадочной машины, основным отличием от которой является применение камеры специальной конструкции (рис. 1).

В камере дополнительно установлено решето (сито), между решетом и установленным ситом размещаются полиуретановые шары, а сверху на сите – искусственная постель (металлическая дробь). На разработанную конструкцию получен патент на полезную модель [2].

Результаты исследований по сравнительной оценке, эффективности использования различных гравитационных аппаратов для выделения свободного золота из комплексных руд представлены графически на рис. 2.

Результаты выполненных тестов подтвердили целесообразность применения гравитационной технологии для переработки исследуемой пробы руды Ново-Широкинского месторождения. Извлечение золота в черновой гравитационный концентрат колеблется в пределах 27,57–36,48 %, серебра – 14,79–22 %, свинца – 14,66–27,94 %.

Для повышения эффективности выделения свободного золота отсадкой в цикле первичного обогащения золотополиметаллических руд изучено влияние основных конструктивных и гидродинамических факторов на работу отсадочных машин.

Для определения оптимальной крупности руды для отсадки проведены тесты на пробах руды, измельченных до крупности 30 (P_{80} - 1 мм), 40, 60, 70 и 80 % класса -0,071 мм.

Оценка влияния крупности исходной руды на показатели отсадки выполнена при двух режимах работы отсадочных машин: режим 1 – базовый; режим 2 – с использованием модернизированной конструкции камеры.

Зависимости извлечения золота, свинца и серебра от крупности исходной руды представлены на рис. 3–5.

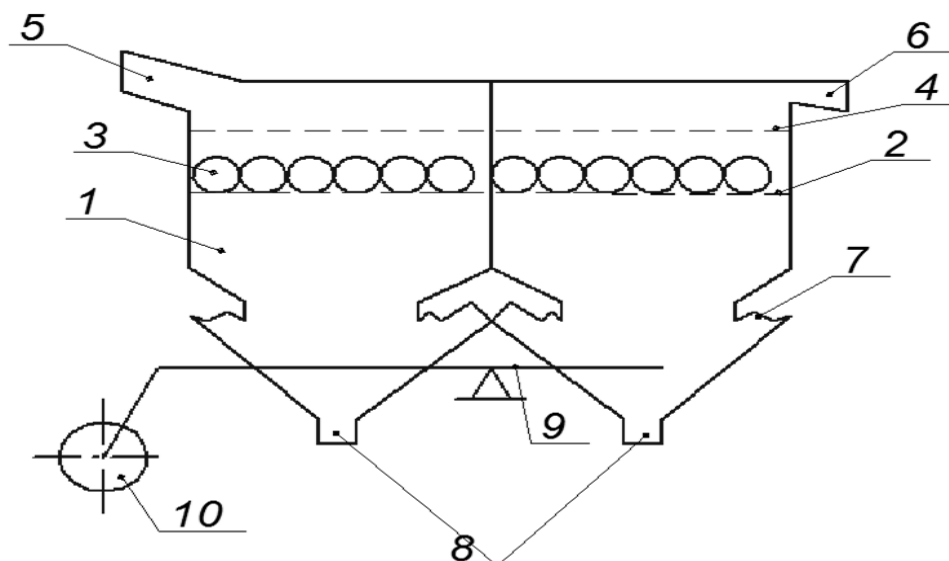


Рис. 1. Лабораторная установка с усовершенствованной камерой

1 – камера; 2 – поддерживающее решето; 3 – полиуретановые шары, размещенные на поддерживающем решете; 4 – шпальтовое сито; 5 – загрузочный желоб; 6 – разгрузочный желоб; 7 – резиновая диафрагма; 8 – разгрузочное устройство; 9 – коромысло; 10 – эксцентриковый вал

Fig. 1. Laboratory unit with a modernized jigging box

1 – jigging box; 2 – ragging screen; 3 – polyurethane balls located on the ragging screen; 4 – slotted screen; 5 – feed chute; 6 – discharge chute; 7 – rubber diaphragm; 8 – discharge device; 9 – rocker arm; 10 – eccentric shaft

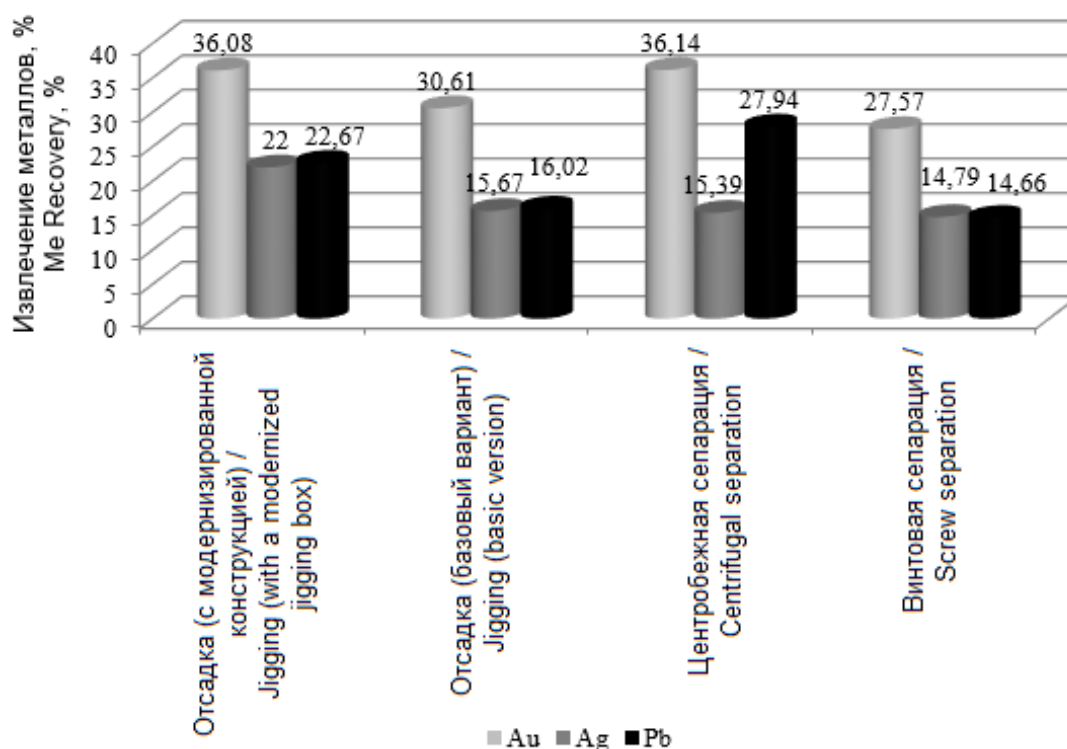


Рис. 2. Показатели извлечения металлов в концентрат гравитации

Fig. 2. Indices of metal recovery to the gravity concentrate

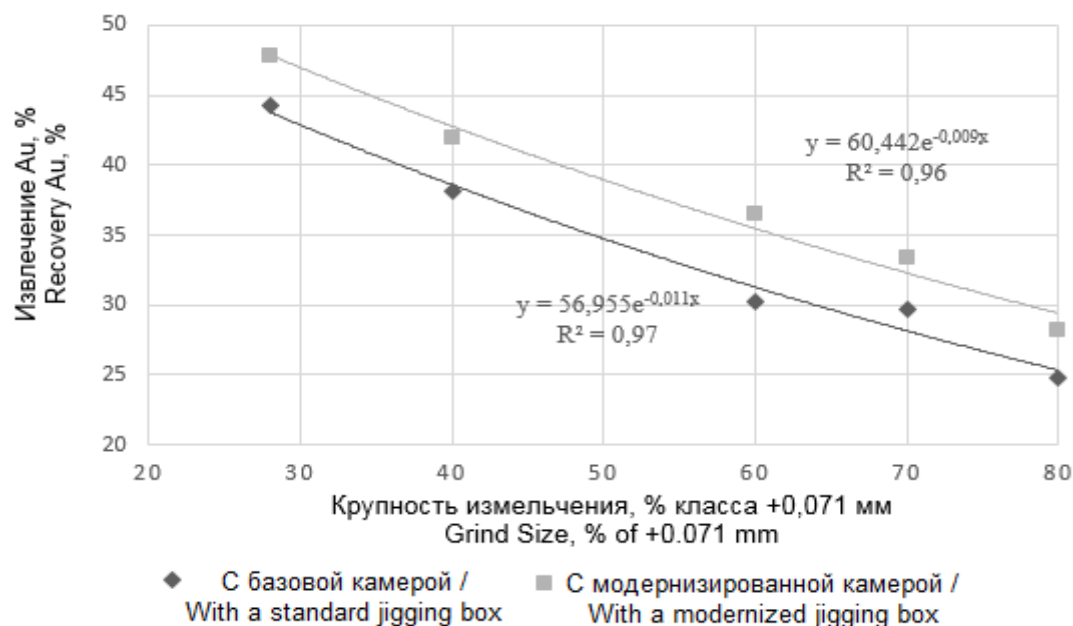


Рис. 3. Зависимость извлечения золота при различных режимах работы отсадочных машин
Fig. 3. Dependence of gold recovery on various operation modes of jigs

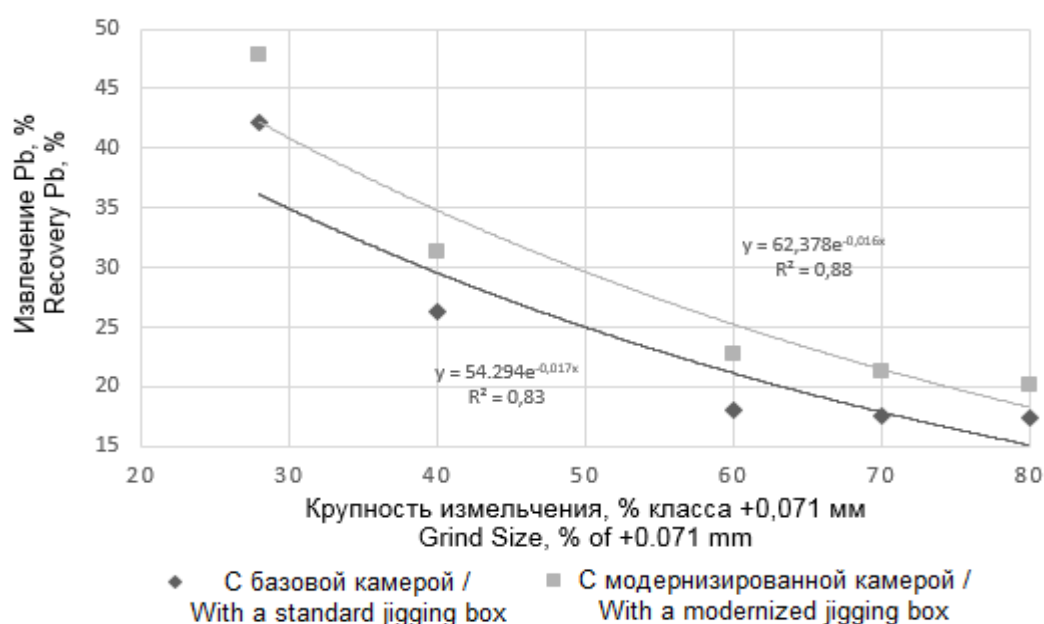


Рис. 4. Зависимость извлечения свинца при различных режимах работы отсадочных машин
Fig. 4. Dependence of lead recovery on various operation modes of jigs

На основе экспериментальных исследований установлено, что оптимальная крупность руды для первичного гравитационного обогащения составляет 80 % класса -1 мм (30 % класса -0,071

мм) и определяется наличием и распределением в руде свободного крупного золота, что подтверждает результаты фазового и минералогического анализов.

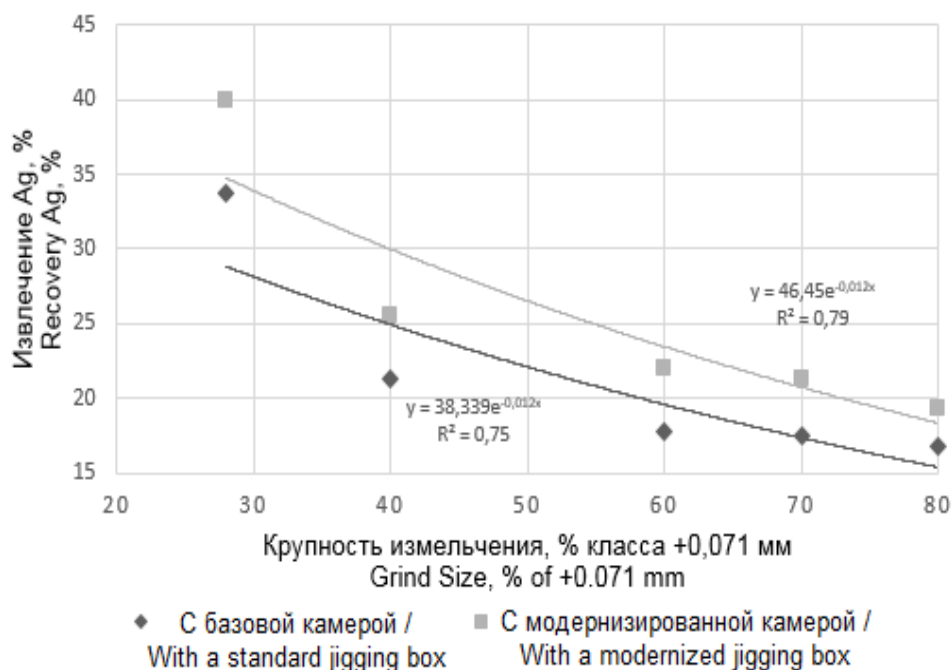


Рис. 5. Зависимость извлечения серебра при различных режимах работы отсадочных машин
Fig. 5. Dependence of silver recovery on various operation modes of jigs

Извлечение золота в концентрат при работе отсадочной машины с модернизированной конструкцией камеры в зависимости от крупности исходной руды колеблется в пределах 28,24–47,78 %, серебра – 19,34–39,97 %, свинца – 20,19–47,8 %.

Таким образом, анализ результатов исследований показывает, что при работе отсадочной машины с модернизированной конструкцией камеры в отличие от базового варианта извлечение золота повышается до 6,2 %, серебра – до 6,23 %, свинца – до 5,66 %.

В ходе экспериментальных исследований установлено влияние параметров работы отсадочной машины на эффективность извлечения золота. К основным параметрам следует отнести амплитуду и частоту колебаний, количественное соотношение в камере отсадочной машины площади, занимаемой очищающими полиуретановыми шарами, к площади решета отсадочной машины $S_{\text{очищающих шаров}} / S_{\text{отсадочной машины}}$, а также

расход воды.

На основании экспериментальных данных выявлены функциональные зависимости извлечения золота от исследуемых параметров работы отсадочной машины.

Полученные данные подтверждаются результатами опытно-промышленных испытаний, проведенными на обогатительной фабрике АО «Ново-Широкинский рудник».

В ходе исследований были испытаны два режима работы отсадочных машин: режим 1 (базовый) и режим 2 (с дополнительным размещением в камере полиуретановых шаров), разработанный на основании предварительных лабораторных исследований. Режимы работы отсадочных машин приведены в табл. 1.

Гранулометрический состав исходного питания отсадочных машин I стадии гравитации с распределением металлов по классам крупности представлен на рис. 6.

Таблица 1

Параметры работы отсадочных машин

Table 1

Jig operation parameters

Режим работы / Operating mode	Параметры работы / Operation parameters			Размер шпальтового сита, мм / Size of a slot- ted screen, mm	Количество шаров, шт. / Number of balls, pcs.
	Высота естественной постели, мм / Bed Height, mm	Ход днища, мм / Stroke length, mm	Диаметр разгрузочной насадки, мм / Spigot diameter, mm		
I стадия гравитации / I gravity stage					
Базовый / Basic	200	18	27	1,6	–
С шарами / With balls	200	18	27	1,6	16

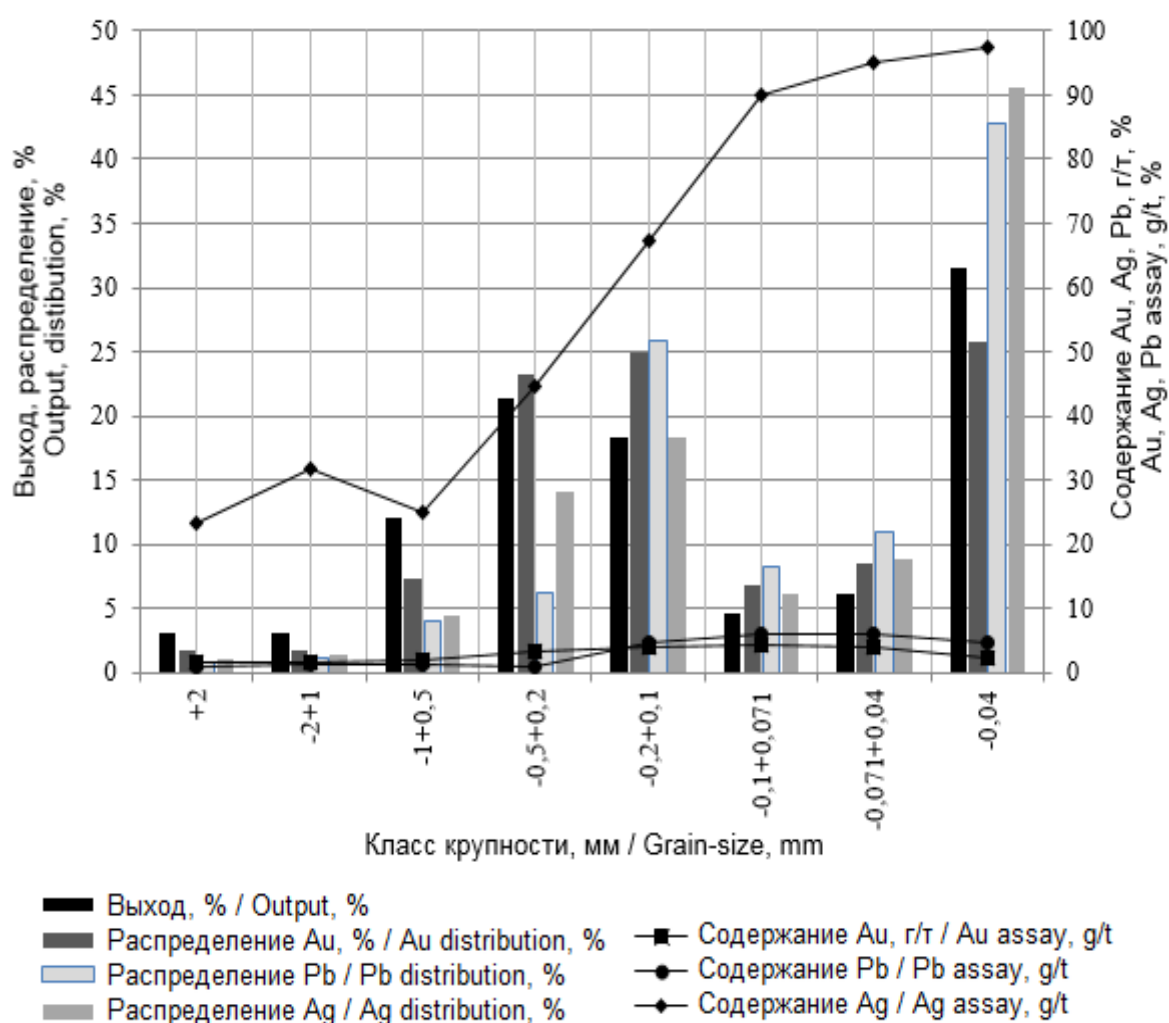


Рис. 6. Распределение металлов по классам крупности
в питании отсадочных машин I стадии гравитации
Fig. 6. Metal distribution by grain-size in the I gravity stage jig feed

Анализ гранулометрического состава исходного питания отсадки показывает, что содержание готового класса - 0,071 мм в питании отсадочных машин составляет 37,7 %. При этом 65,8 % золота распределено в классах +0,071 мм.

В табл. 2 приведены технологические показатели работы отсадочных машин I стадии гравитации по базовому режиму и рекомендованному режиму с использованием полиуретановых шаров.

Таблица 2

Технологические показатели работы отсадочных машин I стадии гравитации
Table 2
Process parameters of I gravity stage jigs

Базовый режим работы / Basic operation mode							
Наименование Продукта / Product	Выход, % / Output, %	Содержание / Assay					
		г/т / g/t		%			
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Концентрат / Concentrate	6,31	4,14	79,4	3,02	0,672	0,34	8,98
Хвосты / Tailings	93,69	2,71	77,48	2,83	0,6	0,22	6,95
Исходная руда / Head ore	100,00	2,80	77,60	2,84	0,60	0,23	7,08
Наименование Продукта / Product	Выход, % / Output, %	Извлечение, % / Recovery, %					
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Концентрат / Concentrate	6,31	9,33	6,46	6,71	7,01	9,43	8,01
Хвосты / Tailings	93,69	90,67	93,54	93,29	92,99	90,57	91,99
Исходная руда / Head ore	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
С использованием полиуретановых шаров / With polyurethane balls							
Наименование Продукта / Product	Выход, % / Output, %	Содержание / Assay					
		г/т / g/t		%			
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Концентрат / Concentrate	12,69	3,593	73,4	2,925	0,615	0,316	9,18
Хвосты / Tailings	87,31	2,68	78,21	2,83	0,59	0,21	6,78
Исходная руда / Head ore	100,00	2,80	77,60	2,84	0,59	0,22	7,08
Наименование Продукта / Product	Выход, % / Output, %	Извлечение, % / Recovery, %					
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Концентрат / Concentrate	12,69	16,31	12,00	13,06	13,16	17,95	16,44
Хвосты / Tailings	87,31	83,69	88,00	86,94	86,84	82,05	83,56
Исходная руда / Head ore	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Анализ полученных результатов испытаний показывает, что извлечение золота в концентрат отсадки I стадии гравитации при базовом режиме (режим 1) работы отсадочной машины составляет 9,33 %, серебра – 6,46 %, свинца – 6,71 %. При работе отсадочных машин по рекомендованному режиму 2 (с дополнительным размещением полиуретановых шаров в камере) извлечение золота в концентрат повышается до 16,31 %, серебра – до 12,00 %, свинца – до 13,06 % (рис. 7).

Закключение

Таким образом, результаты опытно-промышленных испытаний подтвердили, что размещение полиуретановых шаров в камерах отсадочных машин позволяет повысить эффективность разделения минеральных зерен в процессе отсадки за счет устранения забивания шпальтовых сит глинистыми шламами и повышения гидродинамических параметров разделения.

На основании результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований для повышения эффективности процесса рудоподготовки и узла предварительного гравитационного выделения золота предложено несколько технических

решений. Реализация предлагаемых технических и компоновочных решений может быть осуществлена с использованием двух патентно-защищенных поточных линий [3].

Для повышения эффективности обогащения руд Ново-Широкинского месторождения предлагается в действующую схему внести следующие технологические и компоновочные решения:

- ввести в схему узел дробления кусков критической крупности с использованием валкового пресса высокого давления;

- черновые гравитационные концентраты отсадки направлять без доизмельчения на основные концентрационные столы, после чего хвосты основных столов подавать на доизмельчение в шаровую мельницу: это позволяет исключить переизмельчение зерен свободного золота и снизить технологические потери в цикле доводки;

- разместить полиуретановые шары в камерах отсадочных машин для очистки шпальтовых сит: это позволит повысить эффективность разделения минеральных зерен в восходящих и нисходящих потоках [4, 5].

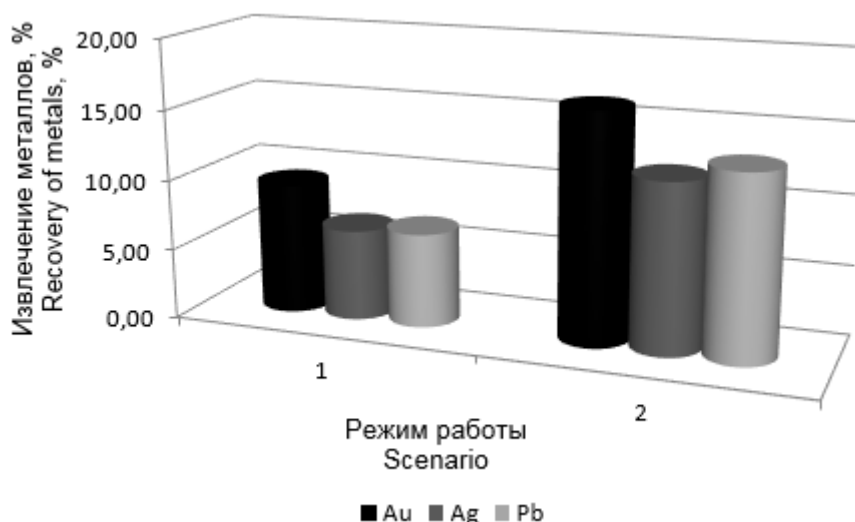


Рис. 7. Извлечение металлов в концентрат гравитации I стадии
Fig. 7. Recovery of metals to the Gravity Concentrate I

Предложенные инновационные решения по построению схемы позволят повысить эффективность извлечения свободных зерен золота и свинца из полиметаллических руд. Прогнозный годовой экономический эффект в результате

внедрения предлагаемых технических решений по модернизации узла рудоподготовки и первичного гравитационного обогащения при переработке руд Ново-Широкинского месторождения составит 129,6 млн рублей.

Библиографический список

1. Мязин В.П., Литвинцев С.А., Чернышева В.И. Оценка технологической изученности комплексных полиметаллических руд Ново-Широкинского месторождения // Вестник забайкальского государственного университета. 2015. № 4 (119). С. 28–36.

2. Пат. № 172003 РФ, МПК В03В5/16. Отсадочная машина диафрагмовая / В.П. Мязин, С.А. Литвинцев. Заявл. 10.01.2017; опубл. 26.06.2017.

3. Пат. № 2608480 РФ, МПК С22В1/00. Поточная линия для комплексного извлечения ценных компонентов из полиметаллических руд / С.А. Литвинцев, А.Н. Кисляков, В.И. Литвинцева, С.Н. Носков, В.П. Мязин. Заявл. 15.09.2015; опубл. 20.09.2015.

4. Литвинцев С.А., Мязин В.П. Повышение эффективности гравитационного обогащения полиметаллических золотосодержащих руд (на примере Ново-Широкинского месторождения) // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XVI международной научно-практической конференции (Чита, 28–30 ноября 2016 г.). Чита, 2016. С. 107–110.

5. Мязин В.П., Литвинцев С.А., Литвинцева В.И. Совершенствование технологии переработки комплексных полиметаллических руд Ново-Широкинского месторождения // Новые технологии в науке о Земле: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Нальчик, 2015. 193 с.

References

1. Myazin V.P., Litvintsev S.A., Chernysheva V.I. Evaluation of the previous metallurgical study of the complex polymetallic ores of the Novoshirokinsky deposit. *Vestnik zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikalian State University], 2015, no. 4 (119), pp. 28–36. (In Russian).

2. Myazin V.P., Litvintsev S.A. *Otsadochnaya mashina diofragmovaya* [Diaphragm jig]. Patent RF, no. 172003, 2017 (In Russian).

3. Litvintsev S.A., Kislyakov A.N., Litvintseva V.I., Noskov S.N., Myazin V.P. *Potochnaya liniya dlya kompleksnogo izvlecheniya tsennykh komponentov iz polimetallicheskih rud* [Production line for the complex extraction of valuable components

from polymetallic ores]. Patent RF, no. 2608480, 2015 (In Russian).

4. Litvintsev S.A., Myazin V.P. *Povyshenie effektivnosti gravitatsionnogo obogashcheniya polimetallicheskih zolotosoderzhashchikh rud (na primere Novoshirokinskogo mestorozhdeniya)* [Improving efficiency of gravity concentration of polymetallic gold-bearing ores (on example of the Novo-Shirokinsky deposit)]. *Materialy XVI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov"* [Materials of the XVI International Scientific and Practical Conference Kulagin's Readings: Equipment and Technology of Production Processes]. Chita, 2016, pp. 107–110. (In Russian).

5. Myazin V.P., Litvintsev S.A., Litvintseva V.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii pererabotki kompleksnykh polimetallicheskh rud Novo-Shirokinskogo mestorozhdeniya* [Improving the technology of Novo-Shirokinsky deposit complex polymetallic ore processing]. *Materialy V*

Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Novye tekhnologii v nauke o Zemle" [Materials of V All-Russian Scientific and Practical Conference "New technologies in the Science of the Earth"]. Nal'chik, 2015, 193 p. (In Russian).

Критерии авторства

Мязин В.П., Литвинцев С.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Myazin V.P., Litvintsev S.A. 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 622.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-137-143>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА ШЕЛЬФЕ

© В.И. Зайцев^а

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

РЕЗЮМЕ. Цель данной статьи – обратить особое внимание на давление гидроразрыва ствола скважины при бурении на нефть и газ на шельфе. Оно существенно ниже, чем при бурении на суше, и может колебаться в значительных пределах. Статей по этому вопросу в отечественной литературе практически нет. Одна из причин этого заключается в том, что бурение по уже разведанным на шельфе месторождениям в настоящее время не производится из-за низких цен на нефть, а бурение с плавающих буровых установок требует огромных затрат. Кроме того, развитие буровых работ при бурении на северных и восточных морях сдерживается суровыми ледовыми условиями и несовершенством бурового оборудования для бурения на воде. Сказывается также недостаточный опыт российских бурильщиков при разработке нефтегазовых месторождений на море. **Методы.** Использован уточненный аналитический расчет давления гидроразрыва ствола скважины и его градиента. **Результаты.** Предлагается для определения давления гидроразрыва вносить поправки на глубину шельфа и высоту стола ротора над средним уровнем поверхности шельфа. Глубина шельфа часто не учитывается якобы из-за его малых глубин. Но кроме указанного фактора еще могут быть причины для кратковременного повышения гидростатического давления: ежедневные приливы, явление поршневания при спуско-подъемных операциях и др. В сумме они могут вызвать поглощение промывочной жидкости. Кроме того, в статье для облегчения расчетов осредненные градиенты горного и пластового давлений даны в табличных вариантах вместо графических. **Выводы.** Определение давления гидроразрыва при бурении скважин на шельфе («мокрых скважин») аналитическим способом является важной задачей, так как дает его реальные значения, что поможет предотвратить поглощение промывочной жидкости.

Ключевые слова: бурение скважин, долото, деформация, испытание, градиент разрыва.

Информация о статье. Дата поступления 7 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 2 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Зайцев В.И. Определение давления гидроразрыва пласта при бурении скважин на шельфе // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 137–143. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-137-143

FORMATION FRACTURE PRESSURE DETERMINATION WHEN DRILLING OFFSHORE HOLES

© V.I. Zaitsev

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

^аЗайцев Виталий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, тел.: (3952) 405278, e-mail: zaicshev@istu.edu

Vitaliy I. Zaitsev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business, tel.: (3952) 405278, e-mail: zaicshev@istu.edu

ABSTRACT. The purpose of the article is to focus on the breakdown pressure of the well bore when drilling offshore for oil and gas. It is much lower than the one when drilling on shore and can vary significantly. Domestic articles on this topic are little to choose. One of the reasons of this situation is that drilling on the already explored offshore deposits is not performed now as the oil prices are low, and drilling from the floating drilling rigs is too expensive. Moreover, severe ice conditions and imperfection of drilling equipment for offshore drilling hinder the development of drilling works in the Northern and Eastern seas. We should also note the lack of experience of Russian drillers in the development of offshore oil and gas fields. **Methods.** The study uses a refined analytical calculation of the breakdown pressure of the well bore and its gradient. **Results.** To determine the breakdown pressure it is proposed to allow for the shelf depth and rotary table elevation above the average level of the shelf surface. The depth of the shelf is often not taken into account allegedly because of its small depths. But the described factor is not the only one that causes a short-term increase in the hydrostatic pressure. It could also be caused by daily tides, swabbing under RIH/POOH operations and etc. All together they can cause the loss of circulation. Besides, the article presents the average overburden and formation pressure gradients in tabular variants instead of graphical ones in order to facilitate the calculations. **Conclusions.** Analytical determination of the fracture pressure when drilling offshore wells (water holes) is an important task as it gives the real values of the fracture pressure. This can help to prevent the loss of circulation.

Keywords: well drilling, drilling bit, deformation, testing, fracture gradient

Article info. Received 7 November 2017; accepted for publication 2 March 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Zaitsev V.I. Formation fracture pressure determination when drilling offshore holes. *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, vol. 41, no. 1, pp. 137–143. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-137-143

Введение

При бурении нефтегазовых скважин на морском шельфе давление гидроразрыва стенок скважины значительно меньше такого же давления при бурении на суше. То есть уже при малых значениях давления гидроразрыва $P_{ер}$ возникают трещины в стволе скважины, что бывает часто неожиданностью для буровой бригады. Без учета этого явления может возникнуть катастрофическая ситуация с поглощением бурового раствора, неустойчивостью ствола скважины и прочими осложнениями и авариями. Экономические последствия при этом непредсказуемы, вплоть до полного отказа бурения в этой точке.

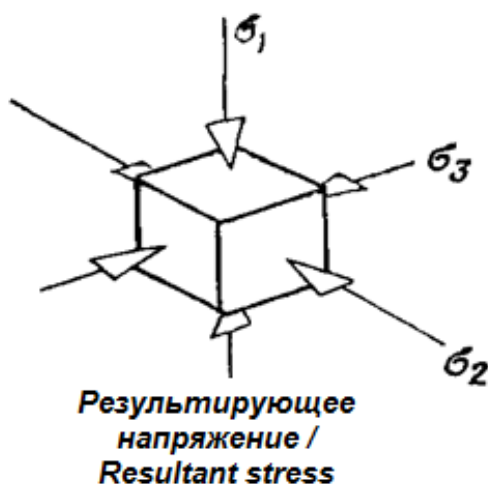
Для определения давления гидроразрыва (градиента давления гидроразрыва) также необходимо вносить поправки на глубину моря и высоту стола ротора над средним уровнем поверхности шельфа, что обычно не учитывается при буровых работах.

Средняя глубина шельфа при использовании морских гравитационных стационарных платформ составляет

60–100 м, а средняя высота стола ротора над поверхностью воды – 25–30 м. Как видно, расстояние от ротора до поверхности водоема может составлять значительную часть глубины акватории шельфа.

Давление гидроразрыва зависит от величины горного давления (рисунок), естественной трещиноватости горных пород, порового давления, проницаемости пород, реологических свойств и расхода жидкости разрыва.

При гидроразрыве связи между частицами породы разрушаются, раскрываются существующие и образуются новые трещины различной формы и простираения, составляя систему проводящих каналов. В процессе поглощения трещины размываются поступающим в пласт раствором. После гидроразрыва поглощения происходят за счет раскрытия трещин в пласте при значительно меньшем гидродинамическом давлении в скважине вследствие разрушения связей между частицами породы, размывости и фиксации их буровым раствором и шламом.



Напряжение элемента горного массива
Stress of the rock massif element

Прочность горной породы обусловлена пределом прочности на растяжение, пределом прочности при сжатии, прочностью на сдвиг или ударной прочностью.

В любой точке горного массива существует три взаимно перпендикулярных напряжения. Максимальное нормальное напряжение σ_1 направлено вертикально и равно давлению вышележащих пород в вертикальных скважинах. Значение давления вышележащих пород для зон с невысокой тектонической активностью и тектонически активных зон составляет 0,0226 и 0,0181 МПа/м соответственно [1].

Нормальные напряжения σ_2 и σ_3 расположены в горизонтальной плоскости и непосредственно влияют на разрыв породы. Теоретическое гидростатическое давление, необходимое для гидроразрыва ствола скважины, должно быть больше или равно минимальному нормальному напряжению σ_3 , однако бурение скважины приводит к увеличению напряжений вокруг стенок ствола настолько, что равнодействующие напряжения в несколько раз превышают минимальные главные нормальные напряжения.

Давление гидроразрыва пластов $P_{гр}$ приблизительно может быть определено по известной эмпирической формуле [1]:

$$P_{гр} \approx (0,49 : 0,91)P_{гор}.$$

Горное давление $P_{гор}$ при бурении скважин на море рекомендуется рассчитывать по формуле [2]

$$P_{гор} = [(\rho_n(H - H_m) + \rho_m \cdot H_m)] \cdot g,$$

где H_m – глубина шельфа, м; ρ_m – плотность морской воды, кг/м³; ρ_n – плотность твердой фазы горной породы, кг/м³;

$$H = \sum_{i=1}^n h_i + H_m,$$

где $\sum_{i=1}^n h_i$ – глубина скважины от дна водоема, м.

Данный метод не учитывает коэффициент Пуассона породы и соотношение напряжений σ_2 и σ_3 и поэтому может дать неверное решение.

Нарушение температурного режима в скважине и колебание гидродинамического давления при бурении скважины вызывают снижение давления гидроразрыва.

Для предупреждения гидроразрыва пластов гидродинамическое давление $P_{зд}$ в скважине рекомендуется поддерживать ниже давления гидроразрыва $P_{гр}$:

$$P_{гр} \leq (0,85 : 0,9)P_{гр}.$$

Повышение гидравлического давления в скважине может вызываться многими факторами, в том числе необходимыми, например утяжелением бурового раствора для борьбы с проявлениями. Явление поршневания при спуско-подъемных операциях может увеличить давление на 3–4 МПа.

Даже кратковременное повышение давления может вызвать поглощение промывочной жидкости. Для ликвидации незначительного поглощения иногда бывает достаточно откорректировать режим бурения.

Градиент давления гидроразрыва – это давление относительной устойчивости пород, то есть минимальное давление на участок ствола скважины, сложенный потенциально неустойчивой породой, при котором в течение продолжительного времени при данном составе бурового раствора не возникают серьезные проявления неустойчивости ствола скважины (прихваты, сужения, затяжки, посадки колонны).

Знание градиента давления гидроразрыва важно при выборе правильной глубины установки башмака обсадной колонны, для предотвращения потери циркуляции и при планировании операций по гидроразрыву пласта с целью повышения нефтеотдачи из зон пониженной проницаемости.

Градиент давления гидроразрыва зависит от типа горной породы, степени анизотропии, пластового (порового) давления, мощности покрывающих пластов и тектонического строения в пределах данной площади. Для получения реальных значений градиента разрыва любой аналитический метод прогнозирования должен учитывать эти факторы.

При бурении скважин градиент разрыва определяют как отношение минимального общего напряжения в пласте к глубине.

Величина значения градиента разрыва $\text{grad}P_{\text{гр}}$ важна для предупреждения

выбросов при регулировании статистического давления в скважине при закрытом устье.

Кроме того, трещина при разрыве пласта может распространяться, создавая сообщение между углеводородными коллекторами и достигая водоносной зоны, что крайне нежелательно. Поэтому определение градиента гидроразрыва, в том числе и аналитическим способом, является важной задачей.

Метод С.А. Кристмана [3] предназначен для расчета градиента разрыва на морских месторождениях. В соответствии с этим методом общая глубина равна сумме глубин морской толщи и скважины. Плотность воды меньше плотности породы, поэтому градиент разрыва на данной глубине меньше для морской скважины, чем для скважины, пробуренной на суше на той же глубине.

Давление вышележащих пород Кристман определяет по формуле

$$P_{\text{гор}} = 0,4335 \cdot \rho,$$

где ρ – средняя объемная плотность.

А градиент разрыва рассчитывает по уравнению:

$$\text{grad}P_{\text{гр}} = F \left(\frac{P_{\text{гор}} - P_{\text{пл}}}{H} \right) + \frac{P_{\text{пл}}}{H},$$

где H – общая глубина; $H = H_{\text{м}} + H_{\text{скв}}$; F – коэффициент соотношения напряжений.

При проникновении жидкости в пласт, то есть для «мокрых» скважин, соотношение радиально действующих на пласт нормальных напряжений b_2 и b_3 изменяется по сравнению с соотношением напряжений при бурении на «суше».

Необходимо отметить, что данное уравнение допустимо лишь для зон с невысокой тектонической активностью, где можно допустить равенство напряжений b_2 и b_3 .

В нефтяной промышленности чаще применяется метод Б.А. Итона [4]. В нем допускается, что давление вышележащих пород и коэффициент Пуассона – переменные величины. Коэффициент Пуассона характеризует свойство горной

породы изменять свои размеры в направлении, перпендикулярном к приложенному напряжению. Таким образом, учитывается действие напряжений в двух измерениях. Большинство пород имеют коэффициент Пуассона 0,25–0,28.

Практика показывает, что коэффициент Пуассона для определенного месторождения является постоянным и может быть получен по предыдущим скважинам того же месторождения.

Однако метод Итона отягощен наличием в нем ряда графиков. Например, график зависимости градиента горного давления от глубины скважины, график определения градиента гидроразрыва в зависимости от градиента пластового давления ($\text{grad}P_{пл}$). А таких параболических линий $\text{grad}P_{пл}$ на графике более 10. Они близко расположены друг к другу и с увеличением глубины чуть ли не сливаются. На производстве рациональнее и удобнее иметь дело с таблицами.

Метод

Приведем пример расчета градиента давления гидроразрыва применительно для морских месторождений с поправками на глубину моря и высоту ствола ротора над средним уровнем моря.

Имеем следующие данные:

- l – высота ствола ротора над уровнем моря – 30 м;
- ρ_m – плотность морской воды – 1060 кг/м³;
- H – глубина воды водоема – 600 м;
- L – глубина спуска обсадной колонны ниже дна моря – 1220 м;
- $\text{grad}P_{пл}$ – градиент пластового давления – 1,1 МПа/м (1120 кг/м³).

Преобразуем толщу воды в эквивалентную (по вкладу в горное давление) толщу пород суши.

Для этого рассчитаем гидравлическое давление морской воды P_m .

$$P_m = 10^{-6} \cdot \rho_m \cdot g \cdot H = \\ = 10^{-6} \cdot 1060 \cdot 9,8 \cdot 600 = 6,23 \text{ МПа.}$$

Определим градиент горного давления от среднего уровня моря до глубины спуска обсадной колонны. Для этого сначала определяем суммарную глубину бурения с учетом глубины акватории:

$$H' = l + H = 1220 + 600 = 1820 \text{ м.}$$

У американского исследователя Б.А. Итона зависимость градиента горного давления дается графически приблизительно в виде правой части параболы функции $y = 2x^n$. Для облегчения расчетов этот график представлен в виде табл. 1, где $\text{grad}P_{гор}$ в единицах (фунт/дюйм²) фут заменен на МПа/м.

Результаты

По табл. 1 определяем градиент горного давления для глубины 1820 м:

$$\text{grad}P_{гор} = 2,1 \text{ МПа/м.}$$

Затем рассчитываем глубину $h_э$, эквивалентную слою морской воды, для района, расположенного на суше, то есть определяем размер слоя породы, если его мысленно заменить слоем воды при сохранении гидростатического давления акватории.

Эквивалентное число метров суши равно:

$$h_э = P_m : (\text{grad}P_{гор} \cdot 10^{-2}) = \\ = (6,23 : 2,1 \cdot 10^{-2}) = 296 \text{ м.}$$

Для расчета градиента давления гидроразрыва определяем эквивалентную глубину $H_э$ с учетом замены глубины акватории на слой суши.

$$H_э = L + h_э = 1220 + 296 = 1516 \text{ м.}$$

Определяем градиент давления гидроразрыва на глубине 1516 м по табл. 2. Этой таблицей мы заменяем график Итона, где присутствует множество близкорасположенных параболических линий, обозначающих пластовое давление, а значения градиента давления гидроразрыва даны в единицах фунт/галлон.

Таблица 1

Осредненная градиента горного давления для всех осадочных бассейнов
с нормально уплотненными отложениями с непрерывным осадконакоплением

Table 1

Averaged gradient of overburden pressure for all sedimentary basins
with normally compacted depositions with continuous sedimentation

Суммарная глубина H , м / Total depth H , m	0	660	1120	1180	2240	3300	3360	4420	4480	5540	6600
Градиент горного давления $\text{grad}P_{\text{гор}}$, МПа/м / Overburden pressure gradient $\text{grad}P_{\text{гор}}$, MPa/m	1,48	1,72	1,94	2,1	2,23	2,35	2,46	2,57	2,68	2,76	2,83

Таблица 2

Градиент давления гидроразрыва в зависимости от глубины

Table 2

Depth-dependent breakdown pressure gradient

Глубина H_3 , м / Depth H_3 , m	Градиент пластового давления $\text{grad}P_{\text{пл}}$, МПа/м / Formation pressure gradient $\text{grad}P_{\text{пл}}$, MPa/m				
	1,10	1,45	1,7	2,0	2,3
0	1,33	1,58	1,80	1,91	2,0
600	1,50	1,70	1,87	1,96	2,05
1200	1,65	1,80	1,91	2,00	2,03
1800	1,76	1,87	1,96	2,04	2,09
2400	1,85	1,94	2,01	2,08	2,13
3000	1,93	2,01	2,05	2,12	2,16
3600	2,00	2,05	2,09	2,14	2,18
4200	2,06	2,10	2,013	2,17	2,2
4800	2,12	2,15	2,17	2,19	2,21
5400	2,18	2,19	2,20	2,21	2,22
6000	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23
	Градиент давления гидроразрыва, МПа/м / Breakdown pressure gradient, MPa/m				

Для градиента пластового давления 1,1 МПа/м и глубины 1516 м градиент давления гидроразрыва равен 1,706 МПа/м (1741 кг/м³).

Определяем давление гидроразрыва:

$$P_{\text{гр}} = \text{grad}P_{\text{гр}} \cdot H_3 \cdot 10^{-2} = \\ = 1,706 \cdot 1516 \cdot 0,01 = 25,86 \text{ МПа.}$$

Пересчитаем градиент давления гидроразрыва в эквивалентную плотность бурового раствора, введя поправку на глубину от стола ротора:

$$\begin{aligned} \text{grad}P_{\text{гр}} &= 10^6 \cdot P_{\text{гр}} : [g \cdot (H' + l)] = \\ &= 10^6 \cdot 25,86 : [9,81 \cdot (1820 + 30)] = \\ &= 1425,0 \text{ кг} : \text{м}^3 (1,396 \text{ МПа/м}), \end{aligned}$$

где $\text{grad}P_{\text{гр}}$ – градиент давления гидроразрыва, исправленный с учетом глубины воды и расстояния от поверхности моря до стола ротора.

Выводы

В процессе бурения гидроразрыв породы может быть огромным. Существующие и новые разломы будут поглощать весь буровой раствор, закачиваемый

в скважину. Крайне нежелательно, если распространившаяся трещина соединит углеводородный коллектор с водоносным. Давно замечено, что давление гидроразрыва морских («мокрых») скважин намного ниже давления гидроразрыва скважин на суше («сухих»). Эта разница может достигать до 50 %. По-видимому, пропитанная водой порода является менее стойкой к давлению бурового раствора. Поэтому так важно при определении гидроразрыва породы и его градиента проводить уточненный аналитический расчет, то есть расчет с учетом глубины акватории и расстояния от ротора до среднего уровня моря.

Библиографический список

1. Рабиа Х. Технология бурения нефтяных скважин / пер. с англ. М.: Недра, 1989. 411 с.
2. Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Сердюк Н.И. Расчеты в бурении: справ. пособие. М.: Изд-во РГГРУ, 2007. 668 с.

3. Кристман С.А. Морской градиент разрыва // Технология нефти. 1973. Август. С. 910–914.
4. Итон Б.А. Расчет градиентов разрыва в третичных бассейнах // Нефтяной инженер. 1969. Май. С. 138–148.

References

1. Rabia Kh. Oil well drilling technology, 1989, 411 p (Russ. ed.: *Tekhnologiya bureniya neftnyanykh skvazhin*. Moscow: Nedra Publ., 1989, 411 p.).
2. Gandzhumyan R.A., Kalinin A.G., Serdyuk N.I. *Raschety v burenii* [Calculations in drilling. Reference book]. Moscow: Russian State Geological Prospecting University Publ., 2007, 668 p. (In Russian).

3. Kristman S.A. Offshore fracture gradient. *Tekhnologiya nefti* [Journal of Petroleum Technology], 1973, august, pp. 910–914. (In Russian).
4. Iton B.A. Fracture gradient calculation in tertiary basins. *Neftyanoi inzhener* [Petroleum Engineer], 1969, may, pp. 138–148. (In Russian).

Критерии авторства

Зайцев В.И. написал статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zaitsev V.I. has written the article 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 502.36:676.08

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-144-152>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГУМИНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ РЕМЕДИАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И СЕЛИТЕБНЫХ ЗЕМЕЛЬ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ МЫШЬЯКОМ И ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

© А.В. Богданов^а, В.И. Дударев^б, О.Л. Качор^с, Н.В. Чайка^д, М.А. Панина^е

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

^еИркутский государственный университет,
664003, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1.

РЕЗЮМЕ. Цель. Исследования по оценке эффективности действия разработанного гуминоминерального комплекса в отношении мышьяка и тяжелых металлов при ремедиации сельскохозяйственных и селитебных почв, подверженных длительному антропогенному воздействию. **Методы.** Приведены исследования по определению оптимальной концентрации гуминового препарата, по оценке влияния исследуемых препаратов-детоксикантов на уменьшение токсичности почв. **Результаты.** С помощью инфракрасных спектров доказаны существенные изменения в структуре гуминоминерального комплекса в сравнении с эталоном гуминовой кислоты. **Выводы.** Рассчитанные коэффициенты синергетического эффекта совместного действия гуминовых кислот и извести разработанного гуминоминерального комплекса при детоксикации загрязненной мышьяком почвы больше в два и три раза по сравнению с индивидуальным действием гуминовой кислоты и извести соответственно.

Ключевые слова: ремедиация, мышьяк, тяжелые металлы, гуминовые кислоты.

Информация о статье. Дата поступления 23 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 12 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Богданов А.В., Дударев В.И., Качор О.Л., Чайка Н.В., Панина М.А. Оценка эффективности действия гуминоминерального комплекса при ремедиации сельскохозяйственных и селитебных земель, загрязненных мышьяком и тяжелыми металлами // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 144–152. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-144-152

^аБогданов Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, e-mail: bogdanov@istu.edu

Andrey V. Bogdanov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mineral Processing and Environmental Protection, e-mail: bogdanov@istu.edu

^бДударев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общеобразовательных дисциплин, e-mail: vdudarev@mail.ru

Vladimir I. Dudarev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Disciplines of General Education, e-mail: vdudarev@mail.ru

^сКачор Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, e-mail: olgakachor@gmail.com

Olga L. Kachor, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mineral Processing and Environmental Protection, e-mail: olgakachor@gmail.com

^дЧайка Наталья Витальевна, аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, e-mail: odu38@mail.ru

Natalia V. Chaika, Postgraduate of the Department of Mineral Processing and Environmental Protection, e-mail: odu38@mail.ru

^еПанина Мария Алексеевна, магистрант, e-mail: next-mail2008@rambler.ru

Maria A. Panina, Master's Degree Student, e-mail: next-mail2008@rambler.ru

EVALUATION OF HUMIC MINERAL COMPLEX EFFICIENCY AT REMEDIATION OF ARSENIC AND HEAVY METALS CONTAMINATED AGRICULTURAL AND RESIDENTIAL LANDS

© A.V. Bogdanov, V.I. Dudarev, O.L. Kachor, N.V. Chaika, M.A. Panina

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003, Russian Federation

ABSTRACT. The **purpose** of the paper is to conduct a study evaluating the efficiency of the developed humic mineral complex against arsenic and heavy metals under the remediation of agricultural and residential soils subjected to prolonged anthropogenic impact. **Methods.** The studies have been conducted in order to determine the optimal concentration of the humic preparation, to estimate the effect of the detoxicating preparations under the investigation on the reduction of soil toxicity. **Results.** Using infrared spectra it has been proved that there are significant changes in the structure of the humic mineral complex as compared with the standard of humic acid. **Conclusions.** It is shown that the calculated coefficients of the synergistic effect of the combined action of humic acids and lime of the developed humic mineral complex are two or three times higher than those under the individual effect of humic acid and lime when conducting the detoxification of arsenic contaminated soils.

Keywords: remediation, arsenic, heavy metals, humic acids

Article info. Received 23 November 2017; accepted for publication 12 March 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Bogdanov A.V., Dudarev V.I., Kachor O.L., Chaika N.V., Panina M.A. Evaluation of humic mineral complex efficiency at remediation of arsenic and heavy metals contaminated agricultural and residential lands. *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. 144–152. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-144-152

Введение

В рамках Федеральной целевой программы «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009–2014)», а также областной программы «Защита окружающей среды в Иркутской области» на 2006–2015 гг., Иркутским национальным исследовательским техническим университетом были проведены работы по ликвидации отходов промплощадки бывшего Ангарского металлургического завода по переработке арсенопиритных руд муниципального образования «г. Свирск» Иркутской области общей площадью 13 га, включающих в себя загрязненный почвогрунт (40 тыс. т), строительные отходы (6,6 тыс. т) и огарки (140 тыс. т) с общим содержанием мышьяка 1600 т. Отходы были обезврежены и захоронены на специальном полигоне Северный-5

Черемховского района [1].

Однако несмотря на ликвидацию источника мышьяковистого загрязнения вся территория муниципального образования «г. Свирск» и прилегающих дачных садоводств общей площадью 25 км² до настоящего времени остается загрязненной с превышением нормативов концентраций мышьяка и тяжелых металлов в почве в десятки и сотни раз. Загрязнению также подвержены и другие объекты окружающей среды: концентрация мышьяка в выращиваемой местной сельскохозяйственной продукции выше фоновой в среднем в 4 раза, в молоке крупного рогатого скота – в 2 раза. У учащихся школ города выявлено среднее превышение референтных значений уровня мышьяка в волосах в 4,5 раза, в ногтях – в 11,5 раза. Таким образом, влияние последствий очага загрязнения промплощадки

Ангарского металлургического завода до настоящего времени прослеживается по всей трофической цепочке до ее верхнего звена – человека, итогом чего уже на протяжении многих лет стали самые высокие удельные показатели смертности по Иркутской области до 20 %¹. Использование общепринятых технологий рекультивации, таких как механическая, химическая или традиционная биологическая с применением растений-фиторемедиантов на исследуемых селитебных и сельскохозяйственных землях недопустимо ввиду их возможного вовлечения в трофическую цепь или вторичного загрязнения объектов окружающей среды. В связи с этим при ремедиации сельскохозяйственных и селитебных земель акцент сделан на использование различных нейтрализующих добавок-детоксикантов в почве без использования растений-фиторемедиантов. В частности, известно использование гуминовых кислот и гуминоминеральных комплексов в технологии ремедиации, основанной главным образом на инактивации поллютантов путем связывания миграционных форм тяжелых металлов, перевода их в неподвижные (водонерастворимые) формы [2]. Однако мышьяк не в полной мере связывается гуминовыми соединениями, поскольку он по своей природе относится к металлоидам, и поэтому необходимое снижение токсичности земель не достигается. Так, по оценкам индекса сродства микроэлементов к гуминовым соединениям исследуемые тяжелые металлы медь, цинк, свинец обладают умеренным сродством, а мышьяк – малым [3]. В большинстве случаев в имеющихся

известных опубликованных литературных источниках приведены исследования по ремедиации выведенных из оборота сельскохозяйственных земель, которые не были подвержены столь длительному антропогенному воздействию, как анализируемый в работе объект. Поэтому задачей исследований авторов данной статьи являлось обоснование технологии рекультивации сельскохозяйственных и селитебных земель с использованием гуминоминерального комплекса, позволяющего наиболее эффективно нейтрализовать соединения мышьяка и тяжелых металлов без дополнительного использования растений-фиторемедиантов.

Методы исследований

Для определения потенциальной возможности использования исследуемого гуминового препарата Гумат-80, полученного из высокоокисленных бурых углей Восточно-Сибирского угольного бассейна, расположенного на территории Красноярского края и частично в Кемеровской и Иркутской областях, были проведены исследования по определению его токсичности согласно «Руководству по определению...»² (рис. 1). В чашки Петри вносили по 20 см³ приготовленного препарата с концентрацией 0,01–5 г/дм³, покрывали фильтровальной бумагой и выкладывали на фильтр по 20 суточных проростков семян кресс-салата.

Как видно из рис. 1, оптимальная концентрация исследуемого гуминового препарата составила 0,32 г/дм³, далее наблюдается снижение степени прорастания семян из-за его токсичного действия. В то же время известно, что

¹Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей природной среды Иркутской области за 2010 год. Иркутск: Изд-во ООО «Форвард», 2011. 379 с. / Public report on the state and protection of environment in the Irkutsk region for 2010. Irkutsk: ООО "Forvard" Publ., 2011. 379 p.

²Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов. М.: РЭФИА, НИА-Природа, 2002. 118 с. / Guidelines for the determination of toxicity of waters, sediments, contaminants and drilling fluids by a biotesting method. Moscow: REFIA, Scientific Research Association – Nature, 2002. 118 p.

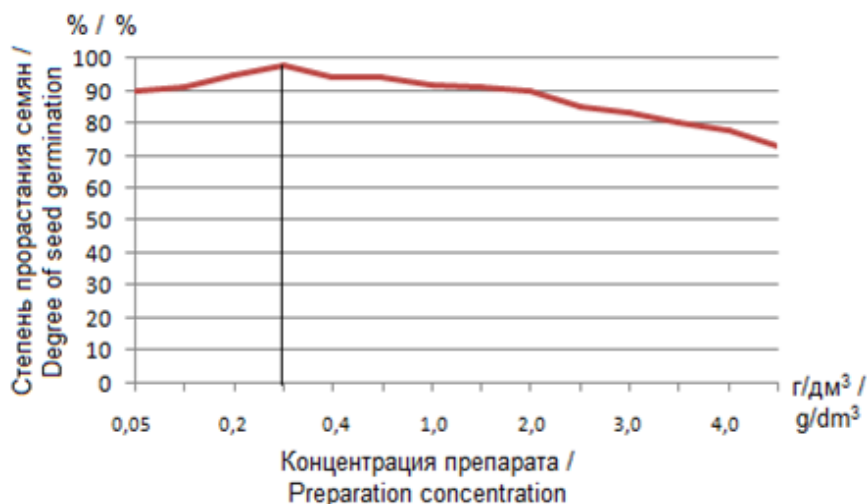


Рис. 1. Определение оптимальной концентрации гуминового препарата Гумат-80
Fig. 1. Determination of the optimal concentration of humic preparation Humate-80

наиболее эффективное взаимодействие поверхностно-активных веществ, к которым относятся гуминовые препараты с тяжелыми металлами, проявляется в их растворимой молекулярной форме в концентрациях до начала образования критической концентрации мицеллообразования, которую определяли методом Ребиндера (рис. 2)³.

Из рис. 2 видно, что увеличение концентрации исследуемого гумата до

0,25 г/дм³ сопровождается снижением поверхностного натяжения на границе раздела фаз «пузырек воздуха – раствор» и достигает минимума в точке критической концентрации мицеллообразования. Найденная концентрация 0,25 г/дм³ соизмерима с оптимальной концентрацией 0,3 г/дм³ (см. рис. 1), установленной при определении степени прорастания семян, и была взята в качестве оптимальной для проведения дальнейших исследований по детоксикации почв.

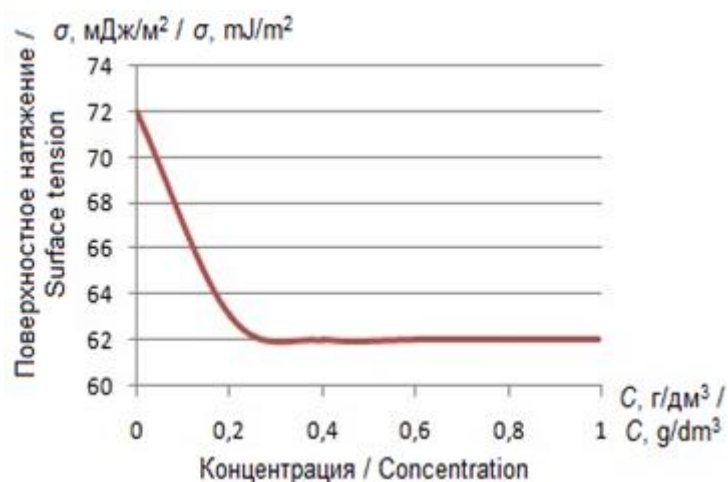


Рис. 2. Критическая концентрация мицеллообразования гуминового препарата Гумат-80
Fig. 2. Critical concentration of Humate-80 preparation micelle formation

³Кольцов Л.В. Лосева М.А. Мицеллообразование в растворах ПАВ: метод. указ. к лаб. работе № 4. Самара: Изд-во СамГТУ, 2012. 9 с. / Koltsov L.V., Loseva M.A. Micelle formation in surfactant solutions:

methodical recommendations to the Laboratory work no. 4. Samara: Samara State Technical University Publ., 2012. 9 p.

На рис. 3 представлены результаты, полученные при оценке влияния исследуемых препаратов-детоксикантов на уменьшение токсичности почв методом прорастания семян в вытяжках почв с исходной концентрацией мышьяка 164 мг/кг.

Как видно из рис. 3, при использовании полученного гуминоминерального комплекса в соотношении извести и Гумата-80 3:1 прорастание семян достигло максимального значения и составило 98 %. Методом биотестирования по рачкам дафниям и хлореллам была определена токсичность образцов почв, представленных на рис. 3. Обработка разработанным гуминоминеральным комплексом [4] снизила токсичность зараженных почв с исходного III до IV (ближе к V) классу опасности, то есть сделала их практически не опасными и пригодными для сельскохозяйственного использования.

Результаты исследований

Увеличение эффективности гуминоминерального комплекса, полученного

из гуминовой кислоты Гумат-80 и раствора известкового молока, по сравнению с их индивидуальными действиями можно объяснить как проявлением синергетического эффекта, так и действием частично образующихся различных молекулярных структурных фрагментов гуминовых солей кальция. Образование солей кальция гуминовых кислот за счет частичного замещения водорода на кальций может увеличивать степень диссоциации структурного комплекса за счет увеличения количества активных центров в его молекулярной структуре, что также приводит к повышению эффективности его действия.

В ИК-спектрах гуминовых кислот, выделенных из бурых углей, обнаружены интенсивные полосы поглощения при 3500–3400 см⁻¹, отнесенные к гидроксильным группам (фенильной и карбоксильной природы)⁴. Аналогичные полосы поглощения наблюдаются и в ИК-спектрах исследуемых образцов (рис. 4), полученных в аккредитованной лаборатории экологического мониторинга

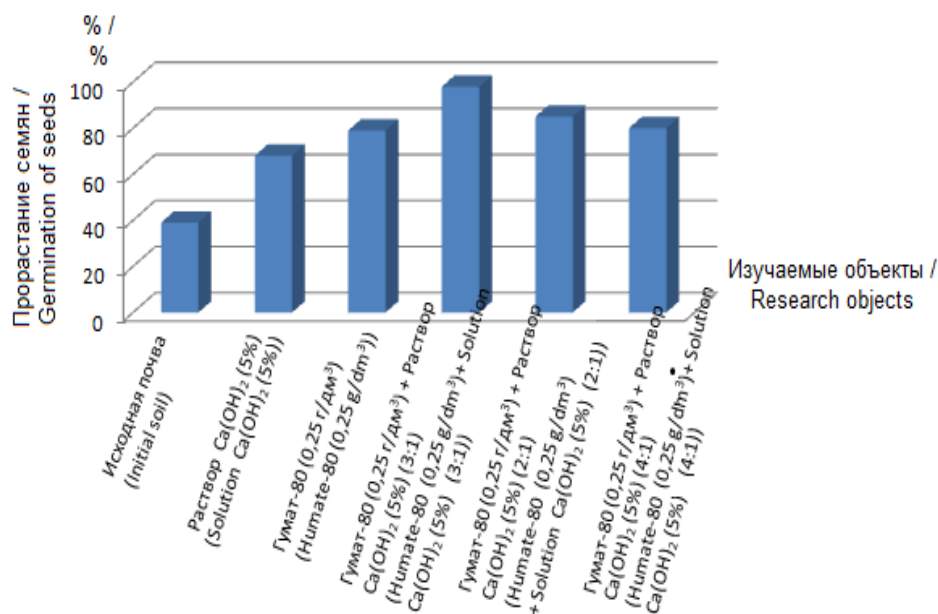


Рис. 3. Степень прорастания семян при использовании препаратов-детоксикантов

Fig. 3. Degree of seed germination when using detoxicants

⁴Перминова И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: дис. ... д-ра химич. наук. М., 2000. 117 с. / Perminova I.V. Analysis,

classification and prediction of the properties of humic acids: Doctor's Dissertation in Chemistry. Moscow, 2000. 117 p.

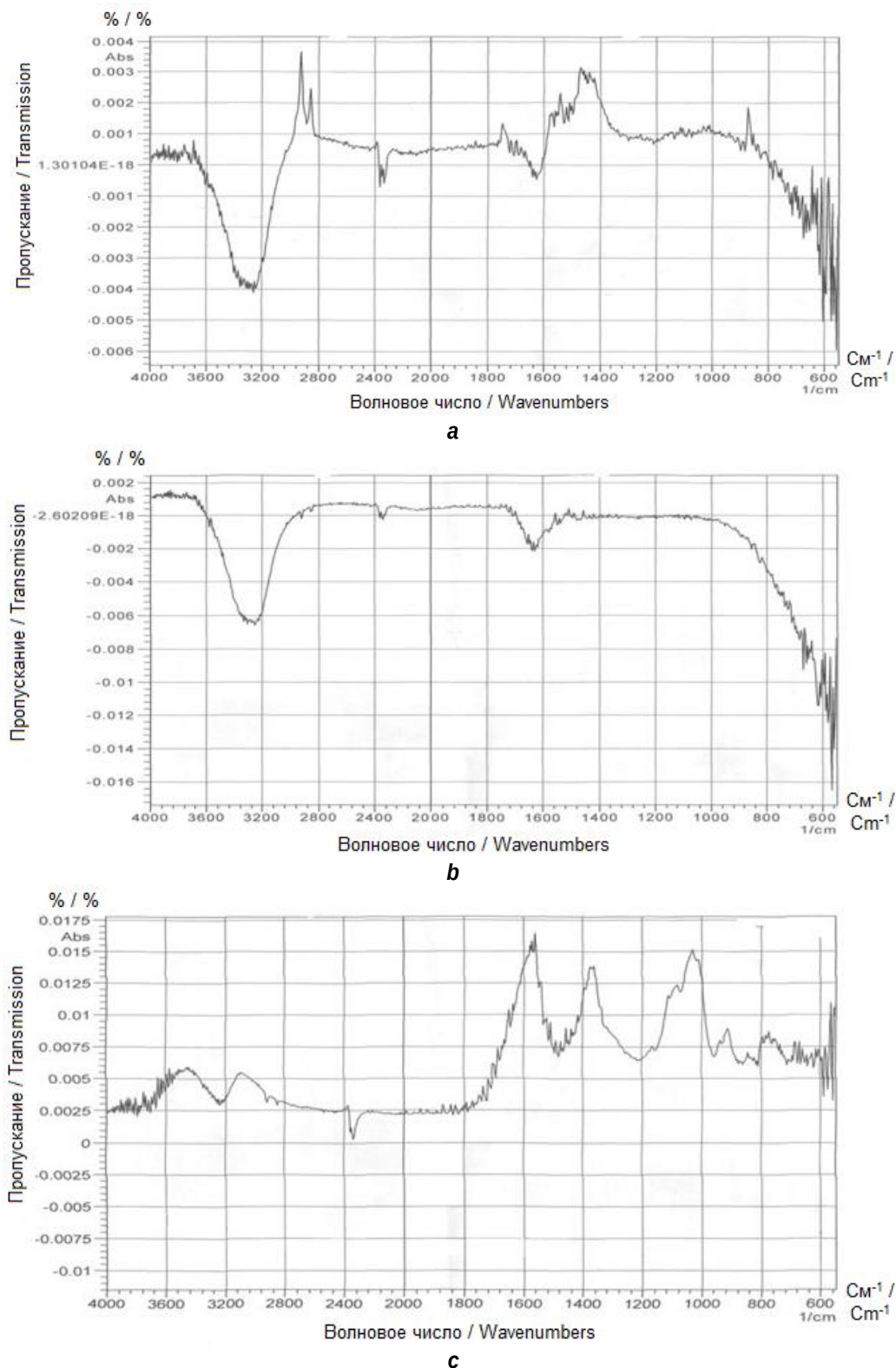


Рис. 4. ИК-спектрограммы:

a – разработанный гуминооминеральный комплекс, *b* – гуминовая кислота, очищенная путем электродиализа (эталон), *c* – Гумат-80

Fig. 4. IR spectral patterns:

a – developed humic mineral complex, *b* – humic acid purified by electrodialysis (standard), *c* – Humate-80

природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета на инфракрасном Фурье-спектрофотометре IR-Prestige-21. Существенные изменения в ИК-спектре гуминоминерального комплекса в сравнении с эталоном гуминовой кислоты наблюдаются в области полос поглощения валентных колебаний карбоксильных групп ($1640\text{--}1680\text{ см}^{-1}$) и метоксильных группировок ($1450, 1520, 1540\text{ см}^{-1}$) [5]. Также присутствуют изменения в области $830\text{ см}^{-1}, 880\text{ см}^{-1}$, характерные для деформационных колебаний связи Me-O-R. Все это свидетельствует об образовании атомами кальция прочных соединений с фрагментами гумусовых веществ. В ИК-спектрах Гумата-80 наблюдаются эффекты, показывающие радикальные изменения структуры гумусового вещества. Можно видеть расщепление каркасной части гуминовых кислот на различные молекулярные фрагменты, обладающие меньшей молекулярной массой, но большим количеством различных активных молекулярных групп, способных взаимодействовать с токсикантами, находящимися в почве.

Рассчитанные коэффициенты синергетического эффекта совместного действия гуминовых кислот и извести разработанного гуминоминерального комплекса при детоксикации загрязненной мышьяком почвы больше в два и три раза по сравнению с индивидуальным

действием гуминовой кислоты и извести соответственно. Синергизм органоминерального комплекса также может проявляться и в избирательном действии не полностью вступивших в реакцию гуминовых кислот и гидроксида кальция к различным миграционным формам мышьяка.

Заключение

Общая величина предотвращенного экологического ущерба почвам по всем направлениям природоохранной деятельности в рассматриваемом регионе муниципального образования «г. Свирск» в течение отчетного периода времени определяется суммированием всех видов предотвращенных экологических ущербов, который составил 255 млн 69 тыс. руб. Расчетное снижение риска здоровью населения муниципального образования «г. Свирск», выполненное по методике информационно-методического письма департамента Госсанэпиднадзора МЗРФ №1100/731-01-111 от 26.03.2001 г. «Оценка риска многосредового воздействия химических веществ», составило 591 дополнительный случай заболеваний раком на миллион человек [6].

Таким образом, разработанный гуминоминеральный комплекс на основе Гумата-80 и извести может быть с успехом применен при рекультивации загрязненных мышьяком сельскохозяйственных и селитебных земель без использования растений-фиторемедиантов.

Библиографический список

1. Качор О.Л., Богданов А.В., Федотов К.В. Оценка правовой и технической возможности ликвидации накопленного вреда окружающей среде мышьяковистыми отходами горно-перерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 42–46. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-11-42-46>

2. Пат. № 2233293 РФ. Гумино-минеральный реагент и способ его получения, способ санации загрязненных почв, способ детоксикации отходов добычи и переработки полезных ископаемых и рекультивации отвалов горных пород и хвостхранилищ, способ очистки сточных вод и способ утилизации осадков / А.И. Шульгин, А.А. Шульгин. Оpubл. 27.07.2004.

3. Уразова Т.С., Бычков А.Л., Ломовский О.И. Механохимическая модификация структуры гуминовых кислот бурого угля для получения сорбентов тяжелых металлов // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87. № 5. С. 664.

4. Пат. № 2546903 РФ, МПК C05G1/00 (2006.01). Препарат для рекультивации земель, загрязненных мышьяком, и состав препарата для рекультивации земель, загрязненных мышьяком (варианты) / А.В. Богданов, О.Л. Качор, Н.В. Чайка. Оpubл. 10.04.2015.

5. Зарубин Ю.П., Пурьгин П.П., Соколова-Попова Т.А. [и др.]. Актуальные проблемы биологии, химии и медицины: монография. Одесса: Изд-во Купrienko СВ, 2014. 235 с.

6. Богданов А.В., Федотов К.В., Качор О.Л. Разработка научных и практических основ рекуперативной технологии эcobетонирования мышьякoдержаших отходов горно-перерабатывающей промышленности: монография. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2014. 180 с.

References

1. Kachor O.L., Bogdanov A.V., Fedotov K.V. Legal and Technical Possibility Assessment of Eliminating Accumulated Damage to Environment by Arsenic Waste from Mining and Processing Industry. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2017, vol. 21, no. 11, pp. 42–46. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-11-42-46>

2. Shul'gin A.I., Shul'gin A.A. *Gumino-mineral'nyi reagent i sposob ego polucheniya, sposob sanatsii zagryaznennykh pochv, sposob detoksikatsii otkhodov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh i rekultivatsii otvalov gornykh porod i khvostkhranilishch, sposob ochistki stochnykh vod i sposob utilizatsii osadkov* [Humic mineral reagent and the method of its production, method of contaminated soil rehabilitation, method of mineral mining and processing waste detoxification and reclamation of rock and tailings dumps, sewage purification method and sludge utilization method]. Patent RF, no. 2233293, 2004. (In Russian).

3. Urazova T.S., Bychkov A.L., Lomovskii O.I. Mechanochemical modification of brown coal humic acid structure for obtaining heavy metal sorbents. *Zhurnal prikladnoi khimii* [Russian Journal of Applied

Chemistry], 2014, vol. 87, no. 5, pp. 664. (In Russian).

4. Bogdanov A.V., Kachor O.L., Chaika N.V. *Preparat dlya rekultivatsii zemel', zagryaznennykh mysh'yakom, i sostav preparata dlya rekultivatsii zemel', zagryaznennykh mysh'yakom (varianty)* [A preparation for arsenic-contaminated soil reclamation and the composition of the preparation for arsenic-contaminated soil reclamation (options)]. Patent RF, no. 2546903, 2015. (In Russian).

5. Zarubin Yu.P., Purygin P.P., Sokolova-Popova T.A. *Aktual'nye problemy biologii, khimii i meditsiny* [Relevant problems of biology, chemistry and medicine]. Odessa: Kuprienko SV Publ., 2014, 235 p. (In Russian).

6. Bogdanov A.V., Fedotov K.V., Kachor O.L. *Razrabotka nauchnykh i prakticheskikh osnov rekuperativnoi tekhnologii ekobetonirovaniya mysh'yaksoderzhashchikh otkhodov gorno-pererabatyvayushchei promyshlennosti* [Development of scientific and practical bases of the recuperative technology for ecological concrete fixation of mining and processing industry arsenic-containing waste]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2014, 180 p. (In Russian).

Критерии авторства

Богданов А.В., Дударев В.И., Качор О.Л., Чайка Н.В., Панина М.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bogdanov A.V., Dudarev V.I., Kachor O.L., Chaika N.V., Panina M.A. 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.

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 по возможности 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 рабочий (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 и их содержимого 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 и их содержимого 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); 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 в библиографическом списке. 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 в квадратных скобках, название источника (транслитерация и перевод на английский язык в квадратных скобках), выходные данные с обозначениями на английском языке. Перевод названия статьи на английский язык обязательно должен соответствовать опубликованному переводу в цитируемом журнале, если таковой имеется. Описание статей, материалов конференций и книг на русском языке заканчиваются описанием языка источника (для русского – In Russian). Если есть, обязательно указывается DOI.

Описание нормативных документов необходимо приводить в транслитерации и в переводе на английский язык в квадратных скобках.

В иных источниках также в дополнение к транслитерации приводится перевод названия источника на английский язык, место издания обязательно должно быть переведено, название издательства остается транслитерированным и обозначается добавлением слова Publ. В получившемся описании заменяются обязательные элементы – «том» на «vol.», «№» на «no.», «с.» на «p.» (для общего количества страниц) и «pp.» для диапазона страниц.

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 в программе «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-314:

главный редактор Семинский Жан Вячеславович, тел.: (3952) 405112, e-mail: seminsky@istu.edu

заместитель главного редактора Снетков Вячеслав Иванович, тел.: (3952) 405102 (многоканальный), e-mail: snetkov@istu.edu

Статьи необходимо направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: (3952) 405069, e-mail: geo_info@istu.edu

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

^{а,с}НИИПИ «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. Исследование технологических типов руд Томинского месторождения меди. Изучение минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов. Выявление минералогических и структурно-текстурных особенностей руд. Выявления 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-серицитовая формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** 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-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых 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.

Формат 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. 2017. Т. 40. № 3. С. 42–47.

^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)

E.M. Kurchevskaya, M.V. Yakhno, A.Y. Senchenko

NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"),
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

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). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2017, vol. 40, no. 3, pp. 42–47. (In Russian)

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

№ 1 (62) 2018

Редактор Ф.А. Посысоева
Компьютерная верстка В.А. Храмовских
Перевод на английский язык В.В. Батицкой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 28.03.2018 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 20,5.
Тираж 500 экз. Зак. 114. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83