



ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

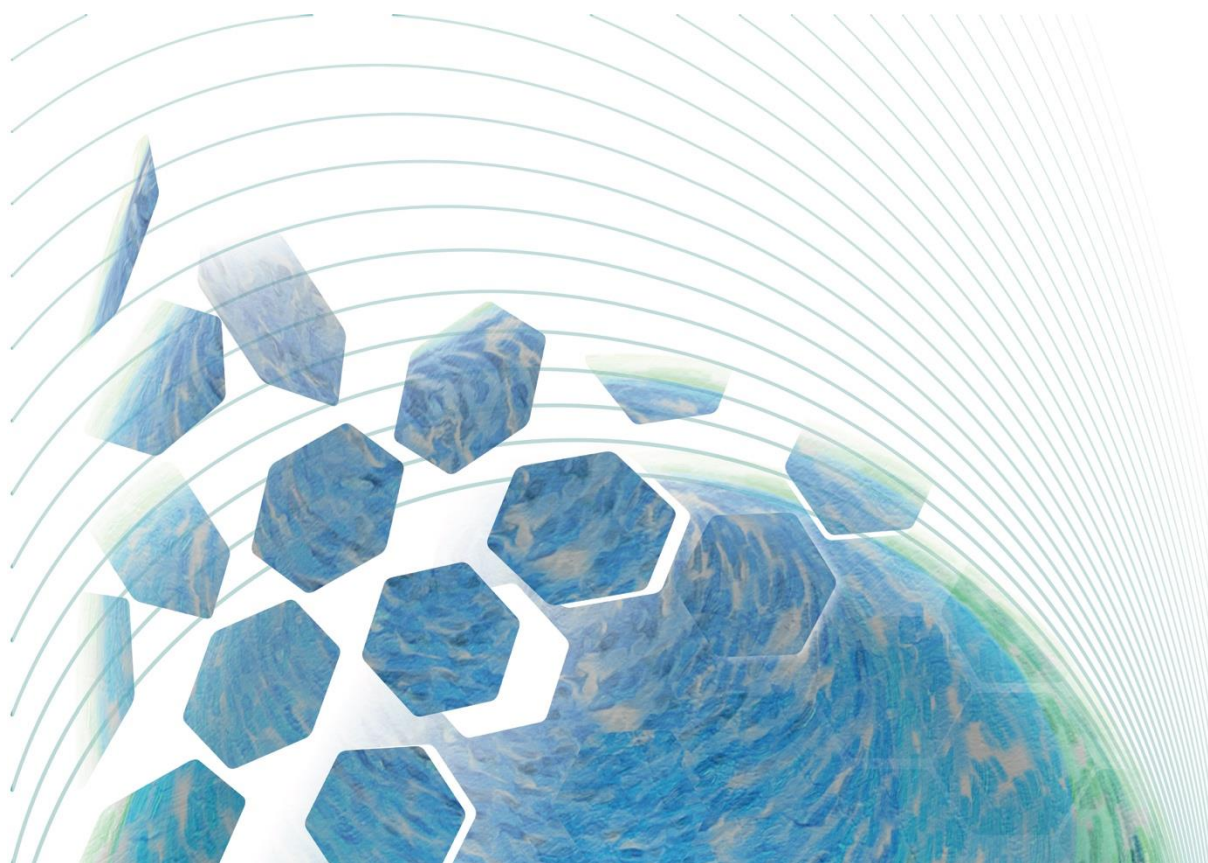
Tom 43 № 1 2020
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 43 № 1 2020

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE



Редакционный совет

Кузьмин М.И., академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Гладкочуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Скляр Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)
Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)
Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Ши Гуаньхай, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)
Чжао Цзюньмэн, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)
Чжан Юнчжань, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)
Шигин А.О., д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
Семинский К.Ж., д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Тимофеева С.С., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Зелинская Е.В., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Морин А.С., д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Председатель редакционного совета:

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Лобацкая Р.М., д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместители главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

Журнал «Науки о Земле и недропользование» имеет государственную регистрацию и **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. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

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 № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

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

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2020

Editorial Council

Kuzmin M.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geochemistry, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Gladkochub D.P., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Sklyarov E.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Gordienko I.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)

Korolkov A.T., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

Makarov V.A., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Ochir Gerel, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

Talgamer B.L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Shi Guanghai, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)

Zhao Junmeng, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)

Zhang Yongzhan, Professor, Nanjing University (Nanjing, China)

Shigin A.O., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Seminsky K.Zh., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Kornyakov M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Timofeeva S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Zelinskaya E.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Morin A.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Chairman of the Editorial Council

Seminsky Zh.V., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Lobatskaya R.M., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Jewelry Design & Technology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editors-in-Chief

Auzina L.I., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Krasnoshtanov S.Yu., Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary

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

The journal "Earth sciences and subsoil use" is officially registered and is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in Cyber-Leninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Inter-university collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "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". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

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. FS77-76110 of June 24, 2019

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

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 2020



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	4
Колонка главного редактора.....	6
Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых	
Гордиенко И.В. Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития.....	8
Бадминов П.С., Сурмаажав Д., Ескин А.Ю., Шкиря М.С. Поиски гидрогеотермальных резервуаров геофизическими методами в Монголо-Байкальском регионе.....	36
Агеенков Е.В., Воднева Е.Н., Ситников А.А. Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м.....	49
Обогащение полезных ископаемых	
Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Флотационные испытания нового комплексного реагента-собиравателя оксидных форм сурьмы на пробе сурьмяной руды месторождения Жипхоша.....	59
Гусева Е.А., Константинова М.В. Состав проб песка юго-западных и центральных районов Прибайкалья.....	66
Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых	
Ташкевич И.Д., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А. Обоснование типов промывочных жидкостей для первичного вскрытия терригенных коллекторов углеводородов (юг Сибирской платформы).....	77
Ламбин А.И. Математическое программирование в задачах оптимизации процессов бурения скважин.....	88
Зайцев В.И. Анализ работы алмазных долот при строительстве скважин в сложных условиях.....	96
Сорокин А.В. Послеремонтные испытания электрических машин шагающих экскаваторов.....	103
Скурихин Ю.Г., Васильев Д.С. Применение тактильной сенсорной системы при сбойке встречных горных выработок.....	111
Результаты полевых исследований	
Лобацкая Р.М., Аузина Л.И., Чжан Юнчжань, Вантеева М.А., Сапрыкина М.И., Семилет А.А., Гиренко Ю.Е. Сравнительный анализ кайнозойского вулканизма Восточно-Китайского блока и Тункинской рифтовой зоны Байкальской рифтовой системы.....	121
К сведению авторов.....	132



CONTENTS

Contents.....	5
Chief Editor's Column.....	7
Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits	
Gordienko I.V. Strategic minerals resources of the Republic of Buryatia: current state and development prospects.....	8
Badminov P.S., Surmaajav D., Eskin A.Yu., Shkirya M.S. Exploration for hydrothermal geological reservoirs by geophysical methods in the Mongol-Baikal region.....	36
Ageenkov E.V., Vodneva E.N., Sitnikov A.A. Influence of the pulse duration and transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for marine waters up to 100 m deep.....	49
Mineral Processing	
Miheev G.V., Bogidayev S.A. Flotation tests of the new complex collecting agent for antimony oxide forms: a case study of the antimony ore sample from the Zhipkhosha deposit.....	59
Guseva E.A., Konstantinova M.V. Composition of sand samples from southwest and central areas of Transbaikalia.....	66
Exploration and Development of Mineral Deposits	
Tashkevich I.D., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A. Validation of the flushing fluid types used in penetrating terrigenous hydrocarbon reservoirs (Siberian platform south).....	77
Lambin A.I. Mathematical programming for process optimization problems in well drilling.....	88
Zaitsev V.I. Analysis of diamond drill bit operation in well drilling under complicated conditions.....	96
Sorokin A.V. Post-repair testing of the walking excavators' electrical machines.....	103
Skurikhin Yu.G., Vasilyev D.S. The use of a tactile sensory system in connecting counter workings.....	111
Results of Field Studies	
Lobatskaya R.M., Auzina L.I., Zhang Yongzhan, Vanteeva M.A., Saprykina M.I., Semilet A.A., Girenko Y.E. Comparative analysis of Cenozoic volcanism in the East China block and Tunkinsky rift zone of the Baikal rift system.....	121
Information for the Authors.....	132



Добрый день, уважаемые читатели!

Перед Вами очередной номер журнала «Науки о Земле и недропользование», первый в наступившем 2020 году. Мы следуем традициям, установившимся за многие годы. Несмотря на то, что в соответствии с запросами времени наш журнал изменил название, при наполнении статьями каждого номера мы придерживаемся сложившихся стандартов и представляем статьи, наиболее интересные и важные для углубления и расширения научного знания в области геологии Сибири и эксплуатации недр. Не является исключением и этот выпуск. Научную геологическую общественность наверняка заинтересует фундаментальная обобщающая статья И.В. Гордиенко, посвященная анализу стратегического минерального сырья Республики Бурятия, серия статей, касающихся методов и результатов поисков месторождений полезных ископаемых в Байкальском регионе и на Сибирской платформе. Это совместные исследования крупных научных коллективов Института земной коры СО РАН, корпорации «Монгол Ус» и Иркутского национального исследовательского технического университета; Вилуйской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА», Лимнологического института СО РАН и Сибирской геофизической научно-производственной компании; Иркутского национального исследовательского технического университета, Института земной коры СО РАН и организации «РН-Бурение». С целью привлечения студентов, магистрантов, аспирантов, только начинающих свой путь в науке и в совместных международных проектах, журнал продолжает публиковать сообщения молодых исследователей. Именно такая статья, касающаяся сравнительного анализа полевых материалов по кайнозойскому вулканизму, полученных в Тункинской рифтовой зоне и Восточно-Китайском континентальном блоке, завершает представленный Вашему вниманию номер.

Желаем нашим читателям заинтересованного прочтения этого номера и приглашаем к участию в следующих выпусках.

**Лобацкая Раиса Моисеевна,
главный редактор**



Dear readers!

We present another issue of the journal “Earth sciences and subsoil use”, the first one in 2020. We follow the traditions established over the years. Although the name of the journal has changed following the demands of the time, we keep the established standards when deciding on the contents of every issue and include the articles that are of interest and importance for the deepening and expanding of the scientific knowledge in the sphere of geology and exploitation of the subsoil resources of Siberia. The present issue goes in the line with the above. The geological scientific community will certainly be interested in the fundamental article by I.V. Gordienko examining the strategic mineral resources of the Republic of Buryatia, as well as in the series of articles relating to the methods and results of the exploration for mineral deposits in the Baikal region and in the Siberian platform area. The articles present the results of joint efforts of the large research teams: the Institute of the Earth’s Crust (the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), “Mongol Us” Corporation, and Irkutsk National Research Technical University; Vilui Geological Survey Expedition (JSC “ALROSA”), the Limnological Institute (the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), and the Siberian Geophysical Research and Production Company; Irkutsk National Research Technical University, the Institute of the Earth’s Crust (the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), and RN-Drilling. In order to involve the students and postgraduates who are just embarking on their way in science and international joint research projects, the journal continues publishing the reports of the young researchers. One of such articles relating to the comparative analysis of the field research materials on the Cenozoic volcanism in the Tunkinsky rift zone and East China continental block concludes the journal issue.

We wish you fruitful reading and invite you to participate in the further issues.

Raisa Moiseevna Lobatskaya,
Editor-in-Chief



Оригинальная статья / Original article

УДК 551.2+552.33+553.04

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-8-35>

Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития

© И.В. Гордиенко^a

^aГеологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Исследования направлены на определение состояния и перспектив развития ресурсов стратегического минерального сырья Республики Бурятия с целью использования их в наукоемких производствах высокотехнологичной промышленности Российской Федерации. Выполнены комплексные геолого-геофизические и прогнозно-металлогенические исследования с учетом ранее проведенных поисково-съемочных, геолого-разведочных и научно-исследовательских работ. Для анализа вещественного состава руд и установления генетических типов месторождений стратегического минерального сырья широко применялись современные минералогические, петролого-геохимические и изотопно-геохронологические методы. Установлено, что геологическое строение региона обусловлено его положением в складчатом обрамлении юга Сибирской платформы, где выделяются благоприятные тектоно-магматические и рудоносные структуры, приведшие к формированию месторождений стратегического минерального сырья различных генетических типов. Ведущее значение имеют и промышленный интерес представляют выявленные в регионе месторождения и проявления бериллия, вольфрама, молибдена, урана, золота, свинца, серебра, никеля, платины, титана, а также алюминия, чистого кварцевого сырья, кадмия, индия, таллия, стронция, бария, редких и рассеянных металлов. Республика Бурятия обладает значительным объемом стратегических металлов, которые способны обеспечить потребности некоторых наукоемких отраслей высокотехнологичной промышленности в нашей стране. Здесь сосредоточено более 700 месторождений полезных ископаемых, из них около 600 учтено государственным балансом. Выявлено более 20 видов минерального сырья, которые относятся к востребованным стратегическим ресурсам.

Ключевые слова: минеральные ресурсы, месторождения, стратегическое сырье, рудные районы, горно-обогатительные комбинаты, перспективы освоения

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 1.4П «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче» (координаторы программы акад. Н.С. Бортников, акад. В.А. Чантурия) и частично гранта РФФИ № 19-05-00312а, а также бюджетной темы лаборатории геодинамики Геологического института СО РАН IX.124.1.3. (гос. номер АААА-А17-117011650013-4, руководитель член-корр. РАН И.В. Гордиенко).

Информация о статье: Дата поступления 15 января 2020 г.; дата принятия к печати 17 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Гордиенко И.В. Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 8–35. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-8-35>

Strategic minerals resources of the Republic of Buryatia: current state and development prospects

© Ivan V. Gordienko^a

^aGeological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The study is aimed at determining the current state and prospects of strategic mineral resources development in the Republic of Buryatia for use in knowledge-based high-tech industries of the Russian Federation. Comprehensive geological, geophysical and forecast metallogenic studies have been carried out based on the previously conducted geological survey, prospecting, exploration, and research work. To analyze the ores' material composition and to establish the genetic types of the strategic mineral deposits, advanced mineralogical, petrological, geochemical, and isotope geochronological methods have been used. It has been established that the geological structure of the region is determined by its position in the folded frame of the Siberian platform south. The formation of the strategic mineral deposits of various genetic types is associated with the favorable tectonic-magmatic and ore-bearing structures distinguished in the region. Of primary commercial importance are the de-



posits and occurrences discovered in the region: beryllium, tungsten, molybdenum, uranium, gold, lead, silver, nickel, platinum, titanium, as well as aluminum, pure quartz raw materials, cadmium, indium, thallium, scandium, strontium, barium, rare and trace metals. The Republic of Buryatia has significant reserves of strategic metals capable to meet the needs of certain high-tech industries in the country. Over 700 mineral deposits are concentrated here, of which about 600 have been inventoried in the state balance. The study has identified over 20 types of mineral raw materials as demanded strategic resources.

Keywords: mineral resources, strategic raw material deposits, ore districts, ore mining and dressing plants, development prospects

Acknowledgements: The research has been conducted with the financial support of the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 1.4P “Deposits of strategic raw materials in Russia: innovative approaches to their forecasting, evaluation and production” (Program Coordinators N.S. Bortnikov and V.A. Chanturia, full members of the Academy) and partial support from the grant of the Russian Foundation for Fundamental Research, project No. 05-19-00312a, as well as from the budgetary project of the Laboratory of Geodynamics, GIN SB RAS IX.124.1.3 (Project No AAAA-A17-117011650013-4; Head of Laboratory I.V. Gordienko, Corresponding Member of RAS).

Information about the article: Received January 15, 2020; accepted for publication February 17, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Gordienko I.V. Strategic minerals resources of the Republic of Buryatia: current state and development prospects. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):8–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-8-35>

Введение

Республика Бурятия располагается на территории Восточной Сибири и входит в состав Дальневосточного федерального округа Российской Федерации. Она занимает удобное экономико-географическое положение в центре азиатской части Российской Федерации, на важнейших путях общероссийского и мирового значения. Геологическое строение территории Республики Бурятия обусловлено положением в складчатом обрамлении Сибирской платформы, где выделяются структуры, представляющие собой фрагменты океанической коры древних океанов (Палеоазиатского и Монголо-Охотского), неопротерозойских и палеозойских островных дуг, активных континентальных окраин и областей интенсивного мезозойского внутриплитного (рифтогенного) магматизма. Геологоразведочными и научно-исследовательскими работами на территории Республики Бурятия общей площадью более 350 тыс. км² обосновано выделение шести рудных районов (Северо-Байкальский, Баунтовский, Курбино-Еравнинский, Селенгинский, Джидинский и Окинский), где сосредоточено более

700 месторождений полезных ископаемых, из них около 600 учтено государственным балансом. По богатству и разнообразию ресурсного потенциала республика занимает одно из ведущих мест среди субъектов Российской Федерации. Здесь выявлено более 20 видов минерального сырья, которые относятся к стратегическим ресурсам.

В Российской Федерации к стратегическим видам минерального сырья относятся полезные ископаемые (минералы, элементы), которые составляют основу отраслей материального производства, обеспечивающих экономическую и оборонную безопасность страны на конкретном этапе ее развития. В Перечне основных видов стратегического минерального сырья, утвержденном Распоряжением Правительства Российской Федерации от 16 января 1996 года № 50-р¹, к стратегическим видам минерального сырья относятся: нефть и природный газ, черные металлы (марганец, хром, титан), цветные металлы (медь, никель, кобальт, свинец, молибден, вольфрам, олово, сурьма), редкие и рассеянные металлы (цирконий, тантал, ниобий, бериллий, иттрий, скандий, ли-

¹ О перечне основных видов стратегического минерального сырья: распоряж. Правит. РФ № 50-р. Утв. 16.01.1996 г. // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9015641> (13.01.2020).



тий, германий, рений), благородные металлы (золото, серебро и платиноиды), а также уран, алмазы и чистое кварцевое сырье.

Осознание значимости минеральных ресурсов для обеспечения экономики и национальной безопасности заставило правительства многих стран, в том числе России, приступить к разработке государственных программ развития стратегических минеральных ресурсов^{2,3}. Было установлено, что большая часть стратегических металлов (марганец, хром, титан, цирконий, вольфрам, кобальт, медь, никель, молибден, свинец, цинк, золото, серебро, металлы платиновой группы, рений, редкоземельные элементы, ниобий, бериллий, литий, тантал, скандий, германий, индий, галлий, висмут, кадмий, гафний), необходимая для обеспечения высокотехнологичных производств в России, включая атомную промышленность, радиоэлектронику, самолетостроение, космическую отрасль, медицину, солнечную энергетику, относится к дефицитным (критическим) и в основном покупается и ввозится из-за рубежа [1].

Освоение минерально-сырьевых богатств Республики Бурятия осуществляется в рамках реализации ряда программ государственного планирования^{4,5}, которые предусматривают мероприятия, направленные на воспроизводство и использование минерального сырья, в том числе стратегических металлов, в модернизации экономики, обороноспособности и безопасности России. В данной статье рассматриваются общее состояние, прогнозы и перспективы раз-

вития ресурсов стратегического минерального сырья Республики Бурятия с целью их использования для дальнейшего устойчивого социально-экономического развития Бурятии, а также в наукоемких производствах высокотехнологичной промышленности Российской Федерации и для возможной поставки на экспорт.

Состояние стратегических ресурсов полезных ископаемых Республики Бурятия

Из перечисленных в Перечне 1996 г. основных видов стратегического минерального сырья в Республике Бурятия имеются разные по масштабам минерально-сырьевые ресурсы, которые представлены как месторождениями собственно стратегических металлов, так и комплексными месторождениями, где стратегические металлы, прежде всего редкие и редкоземельные элементы, могут извлекаться попутно. В Республике Бурятия открыты наиболее крупные в России полиметаллические, редкометалльные и урановые месторождения. Здесь сосредоточено 52 % балансовых запасов цинка и 24,4 % свинца Российской Федерации. Запасы вольфрамовых руд Республики Бурятия составляют 20,4 % от всех разведанных запасов России и 15 % от их добычи в стране.

Доля Республики Бурятия в разведанных запасах молибденовых руд России составляет 32,3 %, причем 20 % запасов представлены самыми высококачественными рудами. В недрах республики имеется балансовых запасов: 95,9 % таллия; 35 % кадмия; 20,3 % ти-

² Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности на период до 2020 года: гос. программа РФ. Утв. 30.01.2013 г. // СамГТУ. [Электронный ресурс]. URL: <http://pmanag.samgtu.ru/sites/pmanag.samgtu.ru/files/2561.pdf> (13.01.2020).

³ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Утв. 01.12.2016 г. // Pravo.gov [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102416645> (13.01.2020).

⁴ О программе социально-экономического развития Республики Бурятия на период до 2020 года: закон РБ № 1903-IV от 14.03.2011 г. Принят 28.02.2011 г. // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/895292263> (13.01.2020).

⁵ Стратегия социально-экономического развития Республики Бурятия на период до 2035 года: закон РБ № 360-VI от 18.03.2019 г. Принят 28.02.2019 г. // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/553221182> (13.01.2020).



тана; 17,2 % барита; 16,3 % колчеданной серы; 16,3 % плавикового шпата (флюорита); 15,3 % хризотил-асбеста; 13 % апатита; 11,3 % бериллия; 8 % серебра; 7,6 % золота; 5,2 % особо чистого кварцевого сырья и кварцитов; 44,6 % вулканического стекла; 33,5 % цеолитов; 0,55 % олова; 0,15 % алюминия Российской Федерации. Разведанные запасы урана категории С₂ только по двум месторождениям (Хиагда и Имское) составляют 92 тыс. т, прогнозные – 140 тыс. т. Сводными запасами в республике учтено 247 рудных и россыпных месторождений золота (16 рудных, 28 россыпных и 3 комплексных) в количестве 1633,12 т, из них коренного золота – 1568,12 т. Имеются также другие объекты стратегического сырья: тантала, ниобия, платины, никеля, марганца, скандия, стронция, рения, редких земель иттриевой и цериевой групп. Практически они во многом дополняют основу минерально-сырьевой базы страны [2–7].

Следует отметить, что основные геолого-разведочные работы на черные, цветные, редкие металлы и нерудное сырье на территории Республики Бурятия проводились в 1960–1970-е и отчасти 1980-е и 1990-е гг. Были разведаны Ореkitканское, Мало-Ойногорское, Жарчихинское молибденовые, Зун-Холбинское, Барун-Холбинское, Ирокиндинское, Кедровское золоторудные, Эгитинское флюоритовое, Озёрное и Холоднинское полиметаллические, Молодежное асбестовое, Ермаковское бериллиевое, Черемшанское кварцитовое, Ошурковское апатитовое месторождения. Однако при их разведке практически не изучались запасы попутных редких и редкоземельных металлов. Остальные объекты, на которых присутствуют стратегические металлы, изучены лишь на стадии поисково-оценочных работ (рис. 1).

До сих пор для большинства месторождений Республики Бурятия нет

экономической оценки, а имеющиеся кондиции были утверждены более чем 20 лет назад [6]. В целом в настоящее время состояние фонда недр Республики Бурятия характеризуется низкой инвестиционной привлекательностью (отсутствие необходимой инфраструктуры в регионе, байкальский фактор экологических ограничений, недостаточная изученность объектов по запасам и качеству минерального сырья, сложные горно-геологические условия, падение мировых цен на отдельные виды сырья, длительные сроки возврата начальных вложений и др.). Из-за этих негативных факторов многие месторождения, находящиеся в нераспределенном фонде, не востребованы. С другой стороны, некоторые лицензионные соглашения, полученные недропользователями на освоение стратегических месторождений полезных ископаемых из распределенного фонда, не выдерживаются по срокам реализации инвестиционных проектов или вообще не выполняются [6, 7] (табл. 1).

В основе Программы социально-экономического развития Республики Бурятия на период до 2020 г. потенциал разведанных запасов минерального сырья оценен приблизительно в 135 млрд долл. США⁶. В табл. 2 приводится реальная обеспеченность Республики Бурятия стратегическими минеральными ресурсами по важнейшим месторождениям по состоянию на 1 января 2017 г., а также их оценка по другим опубликованным библиографическим источникам.

Благородные металлы (золото, металлы платиновой группы, серебро)

Золото. Золотоносность территории Республики Бурятия известна с 40-х гг. XIX в. (начало добычи – в 1844 г.). За весь предшествующий период в республике было добыто не менее 200 т золота. Современная сырьевая база золотодобычи опирается на месторождения

⁶ О программе социально-экономического развития Республики Бурятия на период до 2020 года: закон РБ № 1903-IV от 14.03.2011 г. Принят 28.02.2011 г. // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/895292263> (13.01.2020).

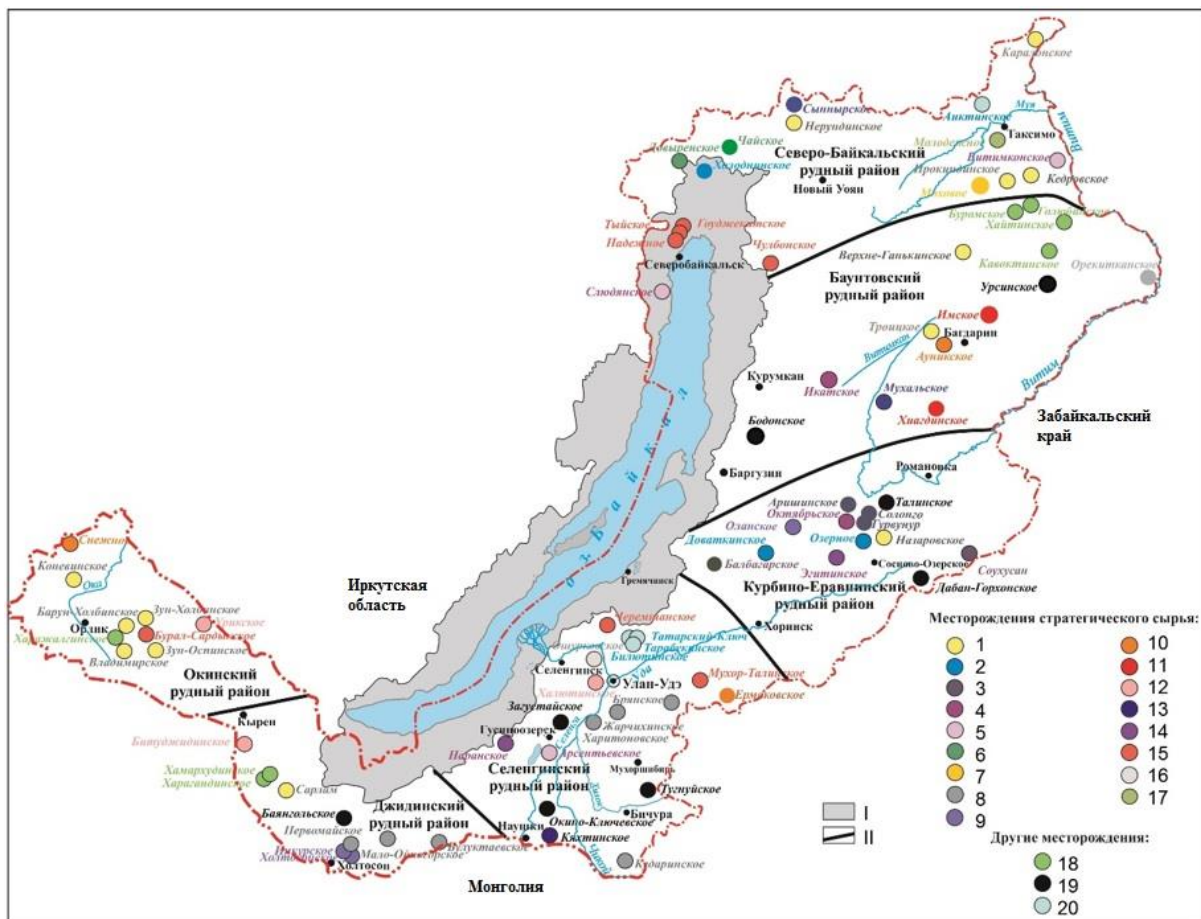


Рис. 1. Схема размещения рудных районов и основных месторождений полезных ископаемых на территории Республики Бурятия [7] с изменением и дополнением

I – центральная экологическая зона вокруг Байкала; II – границы рудных районов
1–17 – месторождения стратегического сырья (1 – золоторудные, 2 – полиметаллические, 3 – железорудные, 4 – марганцевые, 5 – титановые, 6 – медно-никелевые, 7 – оловорудные, 8 – молибденовые, 9 – вольфрамовые, 10 – бериллиевые, 11 – урановые, 12 – редкоземельные, 13 – глиноземные, 14 – флюоритовые, 15 – кварца, перлитов, 16 – апатитовые, 17 – асбестовые);
18–20 – другие месторождения (18 – нефритовые, 19 – угольные, 20 – карбонатные (цемент))

Fig. 1. Allocation scheme for the ore districts and major mineral deposits in the Republic of Buryatia [7], updated

I – central ecological zone around Lake Baikal; II – boundaries of the ore districts
1–17 – deposits of strategic raw materials (1 – gold ore, 2 – polymetallic, 3 – iron ore, 4 – manganese, 5 – titanium, 6 – copper-nickel, 7 – tin ore, 8 – molybdenum, 9 – tungsten, 10 – beryllium, 11 – uranium, 12 – rare-earth, 13 – alumina, 14 – fluorite, 15 – quartz, perlite, 16 – apatite, 17 – asbestos);
18–20 – other deposits (18 – nephrite, 19 – coal, 20 – carbonate (cement))

Окинско, Баунтовского, Северо-Байкальского, Курбино-Еравнинского и Джидинского рудных районов. Сводными запасами в республике учтено 247 рудных и россыпных месторождений золота (16 рудных, 228 россыпных и 3 комплексных). В целом по республике на 1 января 2017 г. общие запасы золота составляли 142,3 т, из них категории С₂ – 92,8 т, прогнозные ресурсы рудного золота оцениваются в 122,7 т, в целом

прогнозные запасы – 1633,12 т. В распределенном фонде находится около 100 % разведанных запасов рудного золота, однако освоение их идет медленно (см. табл. 1).

Перспективы на выявление новых рудных объектов золота различных генетических и морфологических типов имеются в Окинском, Баунтовском, Северо-Байкальском, Курбино-Еравнинском и Джидинском рудных районах.



Таблица 1
Состояние фонда недр по некоторым видам полезных ископаемых
в Республике Бурятия [6]

Table 1

State of the subsoil fund for certain types of minerals,
Republic of Buryatia [6]

Вид полезного ископаемого, ед. изм.	Распределенный фонд недр на 1 января 2017 г.		Нераспределенный фонд недр на 1 января 2017 г.	
	A+B+C ₁	C ₂	A+B+C ₁	C ₂
Металлы цветные:				
вольфрам, т	194748	42295	122602	0
медь, тыс. т	7	53,5	0	74,9
молибден, т	42841	2408	401637	113770
свинец, тыс. т	3475,7	1446,8	0	84
сурьма, т	0	10600	0	0
цинк, тыс. т	21256,3	8460	0	116
Редкие и рассеянные элементы:				
кадмий, т	43696,1	15564,2	0	518
бериллий, тыс. т		19,985		
уран, т	27311	10684	0	0
рений, т	0	216,6	2,5	0
Благородные металлы:				
золото, кг	35578	85385	13926	7418
коренное	26420	82988	7905	5369
россыпное	9158	2397	6021	2049
серебро, т	7308,51	1254,81	4,4	280,6
Неметаллические полезные ископаемые:				
чистое кварцевое сырье и кварциты, тыс. т	40988	4546	3431	545
плавиковый шпат, тыс. т	1619	308	1879	849

Проведенный прогнозно-металлогенический анализ ресурсного потенциала данных районов позволяет уверенно прогнозировать выявление не менее 5–6 крупных и ряда средних месторождений рудного золота. Рост золотодобычи в республике является динамичным и базируется на стратегии развития воспроизводства минерально-сырьевой базы в основном рудного и в меньшей степени россыпного золота [4, 8, 9].

Металлы платиновой группы. Республика Бурятия является перспективным платиноносным регионом, особенно территории Северо-Байкальского, Муйского и Окинского районов. В пределах этих районов выделено несколько платиносодержащих формаций с высоким содержанием металлов платиновой

группы: платина, палладий, рутений, родий, иридий, осмий [8, 10].

Сульфидная платиноидно-медно-никелевая формация Северо-Байкальского рудного района обнаружена в Йоко-Довыренском дунит-троктолит-габбровом массиве, где совмещены два типа оруденения металлов платиновой группы. Сульфидное платиноидно-медно-никелевое оруденение приурочено к приподошвенным плагиоперидотитовым силлам. Прогнозные ресурсы составили: никеля – 147; меди – 51,01; кобальта – 9,47 тыс. т. Для массивных руд характерны повышенные содержания металлов платиновой группы (платины – до 0,52; палладия – до 10; рутения – до 0,34; родия – до 0,48 г/т); золота – до 0,32; серебра – до 23,2; селена – до 23;



Таблица 2

**Важнейшие месторождения, формирующие основу
стратегического минерального сырья Республики Бурятия [2]**

Table 2

**Priority deposits that form the basis
of the strategic mineral raw materials in the Republic of Buryatia [2]**

Месторождение	Полезное ископаемое	Запасы и прогнозные ресурсы		Ранг	Освоенность (лицензия на право пользования недрами)
		Ед. изм.	Категория полезного ископаемого – количество / содержание		
Чайское	Медь, никель, кобальт	Тыс. т	P ₁ – Cu – 193,5 / 0,16; Ni – 627,7 / 0,52; Co – 26,9 / 0,22	Крупное	Оцененное (по ГКМ)
Холоднинское	Цинк, свинец, сера	Тыс. т / %	B+C ₁ +C ₂ – Zn – 195 / 3,99; Pb – 3359 / 0,6; S – 6996/21	Крупное	Разведанное (лицензия УДЭ 13040 ТЭ)
Молодежное	Хризотил- асбест	Млн т / %	B+C ₁ +C ₂ – 14,2 / 6,9	Среднее	Разведанное
Кедровское	Золото	Т / г/т	C ₁ +C ₂ – 7,94 / 19,76	Среднее	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 00385 БР)
Ирокиндинское	Золото	Т / г/т	C ₁ +C ₂ – 8,29 / 19,89	Среднее	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01792 БР)
Чулбонское	Кварцевое сырье	Тыс. т	Забалансовые – 759	Крупное	Оцененное (по ГКМ)
Моховое	Олово	Тыс. т / %	C ₂ – 12,66 / 1,15	Среднее	Оцененное
Ореkitканское	Молибден	Тыс. т / %	B+C ₁ +C ₂ – 360,5 / 0,1	Крупное	Разведанное
Мухальское	Глиноземное сырье	Млн т / %	C ₁ +C ₂ – Al ₂ O ₃ – 206 / 25	Крупное	Оцененное (ГБЗ нет)
Хиагдинское	Уран	Тыс. т / %	B+C ₁ +C ₂ – 11277 / 0,052	Крупное	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01661 ТР)
Озёрное	Цинк, свинец, сера	Тыс. т / %	B+C ₁ +C ₂ – Zn – 8270 / 6,16; Pb – 1564 / 1,2; S – 27242 / 20,42	Крупное	Подготавливаю- щееся к освоению (лицензия УДЭ 12568 ТЭ)
Еравнинская группа	Железо	Млн т / %	C ₂ – 26,42 / 48,18 (проявление Соухусан)	Мелкое	Оцененное (ГБЗ нет)
Назаровское	Цинк, золото	Тыс. т / % т / г/т	C ₁ +C ₂ – Zn – 251,5 / 5,17; Au – 6,28 / 1,21	Среднее	Подготавливаю- щееся к освоению (лицензия УДЭ 01220 БЭ)
Эгитинское	Плавиковый шпат	Тыс. т / %	B+C ₁ +C ₂ – 1615 / 49	Среднее	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01694 ТЭ)
Барун- Холбинское	Золото	Т / г/т	C ₁ +C ₂ – 8,31 / 34,38	Среднее	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01694 ТЭ)
Черемшанское	Кварц, кварциты	Млн т	A+B+C ₁ – 44	Крупное	Разведанное



Боксонское	Бокситы	Млн т / %	Забалансовые – 128,9 / 41,2	Крупное	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 00712 ТЭ)
Ильчирское	Хризотил-асбест	Млн т	A+B+C ₁ +C ₂ – 4,9 / 2,7	Среднее	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 12871 ТЭ)
Зун-Холбинское	Золото	Т / г/т	C ₁ +C ₂ – 8,063 / 11,56	Среднее	Разведанное
Ухагольское	Фосфориты	Млн т / %	C ₂ – P ₂ O ₅ – 56 / 13,9	Крупное	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01785 БЭ)
Ошурковское	Апатиты	Млн т / %	B+C ₁ – P ₂ O ₅ – 108 / 3,8	Крупное	Разведанное
Ермаковское	Бериллий, флюорит	Тыс. т / %	C ₁ +C ₂ – 15,26 / 1,18; 312 / 24,6	Крупное	Разведанное
Жарчихинское	Молибден	Тыс. т / %	B+C ₁ +C ₂ – 45,25 / 0,09	Среднее	Подготавливаемое к освоению (лицензия УДЭ 13303 ТЭ)
Наранское	Плавиковый шпат	Млн т	B+C ₁ +C ₂ – 1,6 / 31,1	Среднее	Разведанное
Мало-Ойногорское	Молибден	Тыс. т / %	B+C ₁ – 154,92 / 0,05	Крупное	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01423 ТЭ)
Холтосонское	Вольфрам	Тыс. т / %	C ₁ +C ₂ – WO ₃ – 32,36 / 0,75	Среднее	Разведанное
Инкурское	Вольфрам	Тыс. т / %	C ₁ +C ₂ – WO ₃ – 184,5 / 0,15	Крупное	Разрабатываемое (лицензия УДЭ 01477 ТЭ)

теллура – до 14 г/т. Прогнозные ресурсы категории Р₂ для массивных руд составили 1 т (платина и палладий). Мало-сульфидный тип оруденения металлов платиновой группы приурочен к стратифицированному горизонту (Риф I) на участке перехода от расслоенной серии к массивным оливиновым габбро. По предварительным данным суммарные прогнозные ресурсы металлов платиновой группы в обоих типах оруденения Йоко-Довыренского массива оцениваются так: платины – 98, палладия – 84, золота – 56 т. Среднемамаканский лерцолит-пироксенит-габбровый массив находится в пределах Каралон-Мамаканской структурно-формационной зоны. Вмещает медно-никелевое оруденение с платиноидами. Прогнозные ресурсы металлов платиновой группы категории Р₃ оценены в 10 т. Месторождение Каменное находится в бассейне одноименного ручья, впадающего севернее Парамского массива в р. Витим. Повышенная платиноносность выявлена

во всех типах руд и колеблется, по данным микропробного нейтронно-активационного анализа, следующим образом: для платины – 2,5–34,3; для рутения – 0,022–0,525 г/т. По данным рентгенофлуоресцентного анализа содержание палладия составляет 2,98; родия – 0,53 г/т.

Платиносодержащая хромитовая формация с максимальными концентрациями металлов платиновой группы (до 3,3 г/т в сумме) с преобладанием осмия, рутения, иридия и платины характерна для тел хромитов Парамского и Шаманского массивов, расположенных по обеим сторонам р. Витим. В жилах и шлирах хромитов Парамского массива отмечены повышенные содержания металлов платиновой группы: иридия – менее 0,1; платины и родия – 0,01; рутения – 0,015; палладия – до 0,02 г/т. Шаманский массив находится в междуречье Витима, Таксимо и Нелинды на правом борту р. Витим. Известно около 15 точек хромитовой минерализации, представ-



ленной жилами и шлировыми обособлениями сплошных хромититов. В пределах Чайского медно-никелевого месторождения металлов платиновой группы установлено в сплошных рудах: платины – до 0,55; палладия – до 0,2; родия – до 0,02 г/т.

Платиносодержащая золоторудная формация обнаружена в Ирокиндинском месторождении золота на юго-востоке Муйского района, где повышенные концентрации платины (до 2,5–7,3 г/т) характерны для жильного кварца с пиритом, сфалеритом, галенитом и блеклой рудой. В Окинском рудном районе в Зун-Холбинском месторождении золота максимальные содержания платины обнаружены в кварц-сульфидно-теллуридных жильно-штокверковых рудах – 13,4 г/т. Содержания палладия значительно ниже и лишь в кварц-сульфидно-теллуридных рудах достигают промышленных значений – 4 г/т. Апоультрамафитовые метасоматиты бассейна р. Тустук находятся в юго-восточной части Окинского района. В отдельных пробах пиритизированных родингитов содержания платины достигают 0,026, а палладия – 0,55 г/т. В хлоритовых метасоматитах выявлены промышленно значимые концентрации платины (до 5,2 г/т), палладия (до 10 г/т) и золота (до 15 г/т).

Что касается рассыпных проявлений платиноидов, выявлены многочисленные минералы металлов платиновой группы в золотоносных россыпях Восточного Саяна (Окинский рудный район) и в бассейне р. Джиды (Джидинский рудный район) [11, 12]. Самородная платина, осмистый иридий с рутением в окатанных зернах отмечались при отработке россыпей золота в притоках р. Багдарин (Ауник, Киро, Амандак), размывающих Шаманский массив габброидов и ультраосновных пород в Баунтовском рудном районе.

Серебро. В недрах Республики Бурятия выявленные запасы серебра категории А+В+С₁ – 7312,91; категории С₂ – 1535,41 т (см. табл. 1). Серебро не обра-

зует самостоятельных месторождений и может добываться попутно при эксплуатации полиметаллических и золото-полиметаллических месторождений (Озёрного, Назаровского, Холоднинского, Намаминского, Таборного и Доваткинского). Наиболее высокое содержание серебра (483,3 г/т) обнаружено в полиметаллических рудах Намаминского месторождения. В свинцово-цинковом Доваткинском месторождении запасы серебра со средним содержанием в руде 164,3 г/т категории С₂ составляют 266,2 т, прогнозные ресурсы категории Р₁ – 1643 т. На Назаровском месторождении количество серебра категории С₂ достигает 270 т при среднем содержании 52,43 г/т. Дальнейшие перспективы увеличения запасов серебра в Республике Бурятия связаны с добычей золота, цинка и свинца [13].

Черные металлы (железо, марганец, титан, хром)

Железо. По генетическим типам руды железа подразделяются на контакто-метасоматические (магнетитовые) и гидротермальные (сидеритовые). Наибольшее число месторождений и проявлений железа сосредоточено в Курбино-Еравнинском рудном районе. Здесь известны 21 мелкое и ряд крупных не до конца разведанных месторождений. Скарновое (магнетитовое) месторождение Солонго располагается в Озёрнинском рудном узле среди раннекембрийской осадочно-вулканогенной олдындинской свиты, где образует ряд пласто- и линзообразных тел протяженностью около 3000 м при средней мощности около 20 м. Концентрация железа в рудах варьирует от 26 до 65,5 %, в среднем она составляет 40,5 %. Запасы категории С₂ составляют 150 млн т. К месторождению Солонго примыкают другие аналогичные месторождения: Соухусанское, Укырское, Гурвунур, Мухор-Горхонское, Мылдыгенское, Балбагарское. Практическое значение также могут иметь железорудные сидеритовые руды Озёрного колчеданно-полиметал-



лического месторождения. Установлено пять сидеритовых залежей среди осадочно-вулканогенных пород олдындинской свиты размером от 100 до 1950 м при мощности от 5 до 55 м. Среднее содержание в них составляет: железа – 30,7; серы – 2,6; цинка и свинца – до 0,11; марганца – до 4 %. Запасы сидеритовой руды составляют 29,1 млн т. Следует отметить, что посредством геофизических исследований в Озёрнинском рудном узле выявлен целый ряд крупных перспективных железорудных участков, которые оцениваются довольно высоко и требуют детальной разведки [14].

Марганец. Как указывалось выше, проявления марганца с содержанием до 4 % довольно широко распространены в рудах Курбино-Еравнинского рудного района. Собственно марганцевые месторождения сосредоточены в кремнисто-карбонатных породах неопротерозоя и раннего кембрия. К подобным объектам относится Икатское месторождение контактово-метаморфического типа. Первичные, преимущественно манганокальцитовые руды, содержащие до 15 % марганца, превращены в зоне контакта с гранитоидами в кварц-родонит-бустамитовые руды. Протяженность рудных тел – 1–2 км при мощности до 30 м. Запасы марганцевых руд категории C_2 с концентрацией марганца от 20,2 до 24,5 % составляют 1,3 млн т, а с концентрацией от 5 до 10 % – 5 млн т. Прогнозные ресурсы категории P_3 – 60 млн т [15].

Титан. В пределах Республики Бурятия широко развиты базитовые и базит-ультрабазитовые массивы, с которыми связаны многочисленные малые месторождения и проявления ильменит-титаномагнетитового оруденения. Титановое оруденение в Северном Прибайкалье выявлено в габброидах Слюдянского, Орколиканского, Левомамского, Бирамьинского, Нюрундуканского, Бираканского, Правомамского массивов. Из них наибольший интерес представляет

Слюдянское месторождение в неопротерозойских габбро-норитах чайского комплекса с содержанием титана в сплошных магнетит-ильменитовых рудах 17,6–25,6 % и прогнозными ресурсами категории P_1 30 млн т TiO_2 . Однако, несмотря на многочисленные находки титанового оруденения, Северо-Байкальский район не может считаться перспективным в отношении титана из-за того, что большая часть массивов расположена в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории.

В связи с этим наиболее перспективным является Муйский рудный район. Здесь находится перспективный на титан крупный Витимконский массив, а также потенциально титаноносные Ирокиндинский и Кедровский массивы с золоторудным и сульфидным оруденением. Витимконский массив входит в состав Байкало-Муйского базит-гипербазитового пояса. Общая площадь его – около 90 км² при максимальной длине 14 и ширине 7 км. Выделено семь проявлений ильменитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд с содержанием TiO_2 от 3 до 14 % вкрапленного, густовкрапленного и массивного сложения в трахитоидных габбро и габбро-анортозитах. Оруденение комплексное – железо-ванадий-титановое с небольшим количеством сульфидных минералов. Прогнозные ресурсы только одного Магнитного рудопроявления, посчитанные до глубины 300 м, превышают 1,5 млрд т руды, а до глубины 200 м – 1 млрд т.

Богатое ильменит-титаномагнетитовое оруденение обнаружено в массивах Хаактыг-Ой и Жомболокский Окинского рудного района. В массиве Хаактыг-Ой руды содержат до 9,38 % TiO_2 , а в Жомболокском массиве – до 6,8 %. В Селенгинском рудном районе наиболее богатым на титан оруденением является Арсентьевский массив. Его руды относятся к железо-титан-ванадиевым. Выделяется три основных типа титаномагнетит-ильменитовых руд: вкрапленные,



густовкрапленные и массивные (сливные). Количество рудных минералов в массивных рудах достигает 80–90 %, в густовкрапленных – 50–60 %, во вкрапленных не превышает 40 % (обычно в пределах 15–20 %). Массивные титаномагнетит-ильменитовые руды характеризуются повышенными содержаниями цинка (от 200 до 500 г/т) и кобальта (от 73 до 112 г/т), а также низкими концентрациями хрома (от 21 до 36 г/т) и особенно никеля [15].

Хром. Богатые проявления хромитов без подсчета запасов обнаружены в гипербазитах ильчирского комплекса в Окинском районе Восточного Саяна, а также в ультраосновных породах Шаманского массива бассейна р. Витим, где ресурсы хромитовых руд категории Р₃ оцениваются в 40 млн т. В хромититах отмечается платина: от 0,8–1,25 до 2,44 г/т, в среднем 1 г/т.

Особый интерес представляет хромитовое проявление Гольцы в ультраосновных породах Курбино-Еравнинского рудного района. Хромитовые руды локализованы в зоне мощностью 2–3 м и протяженностью 70–80 м. Хромит образует мелкую вкрапленность (10–15 % от объема породы), гнезда и прожилки в оталькованных дунитах. В нижней части залежей гипербазитов установлено сингенетическое вкрапленное хромитовое оруденение. В дальнейшем здесь необходимо провести детальные поисково-оценочные работы [15].

Цветные металлы (вольфрам, молибден, цинк, свинец, олово, медь, никель, алюминий)

Среди цветных металлов в Республике Бурятия наибольший интерес представляют месторождения вольфрама, молибдена, свинца и цинка. Запасы вольфрамовых руд Бурятии составляют 20,4 % от всех разведанных запасов Российской Федерации и 15 % от их добычи в стране. Доля Республики Бурятия в разведанных запасах молибденовых руд Российской Федерации состав-

ляет 32,3 %, причем 20 % запасов представлены самыми высококачественными рудами. В республике сосредоточено 48,8 % балансовых запасов цинка и 24,4 % запасов свинца Российской Федерации, из которых попутно могут извлекаться разнообразные редкие и редкоземельные элементы.

Вольфрам. Россия занимает третье место по разведанным запасам вольфрама. В этой ситуации вольфрамовые месторождения Джидинского рудного района представляют реальный практический интерес. Инкурское месторождение является наиболее крупным месторождением России штокверкового геолого-промышленного типа. По запасам и содержанию в рудах триоксида вольфрама WO₃ Инкурское месторождение сопоставимо с наиболее крупными месторождениями мира аналогичного промышленного типа: разрабатываемыми месторождениями Хемердон (Великобритания), Пайн-Крик (США), разведываемым месторождением Ундур-Цаган (Монголия). Холтосонское месторождение находится западнее Инкурского месторождения. Оно относится к жильному типу, сложено кварц-гюбнеритовыми жилами с переменным количеством сульфидов, залегает в кварцевых диоритах. Холтосонское месторождение является наиболее крупным месторождением России жильного геолого-промышленного типа. С учетом погашенных за период отработки запасов (руды – 8,2 млн т; WO₃ – 57,4 тыс. т.) Холтосонское месторождение занимает второе место в мире по запасам WO₃ (73,9 тыс. т) после месторождения Сихуашань в Китае [11].

Молибден. В России в настоящее время разрабатываются месторождения с содержанием молибдена 0,05 %. Республика Бурятия обладает значительной сырьевой базой богатых (свыше 0,1 %) молибденовых руд [16, 17].

Орекитканское месторождение расположено на левобережье среднего течения р. Витим в Баунтовском районе Республики Бурятия, в 200 км восточнее



районного центра – п. Багдарин. Оно относится к штокверковому типу молибденовой формации. Залегают месторождения в пологой зоне интенсивной трещиноватости среди биотитовых гранитов раннепалеозойского возраста, отходящей от крутопадающего разлома на контакте массива мезозойских гранитов. Зона имеет пологое падение ($25\text{--}30^\circ$). Длина ее по простиранию – 2100, по падению – 2000 м. Руды представлены кварц-молибденовыми прожилками с вкрапленностью и гнездами молибденита, пирита, магнетита, реже берилла, халькопирита, сфалерита, вольфрамита и других минералов. Содержание BeO в рудах – от 0,002 до 0,03 %; WO_3 – от 0,003 до 0,1 %. В молибдените имеются высокие содержания рения, теллура, селена, запасы которых не подсчитывались. Рудные тела, которых на месторождении пять, сложены почти исключительно (99 %) первичными сульфидными рудами. По запасам месторождение является крупным, со средним содержанием молибдена в рудах 0,099 %; примерно 30 % руд представлено относительно богатыми разностями (0,138 %). Руды легкообогатимы: извлечение молибдена в 50 %-й концентрат методом простой флотации – не менее 90 %. Горно-геологические условия для открытой разработки благоприятные, коэффициент вскрыши составляет $0,24 \text{ м}^3/\text{т}$. Основная масса руд залегает на верхних горизонтах, что позволяет вести их добычу наиболее дешевым способом. До глубины 120 м от поверхности долины р. Большой Арекиткан сосредоточено 66 % рядовых и 76 % богатых руд. Это позволит в первые годы эксплуатации месторождения добывать наиболее богатые руды. По состоянию на 1 января 2010 г. на балансе по Орехитканскому месторождению числятся запасы руды: категории В – 52784, категории C_1 – 196343, категории C_2 – 118221 тыс. т; молибдена: категории В – 53673, категории C_1 – 193042, категории C_2 – 113770 тыс. т.

Жарчихинское месторождение молибдена находится в 40 км от г. Улан-Удэ в непосредственной близости от автомагистрали и железной дороги. Оно представляет собой почти вертикальное трубообразное тело минерализованных эруптивных и эксплозивных брекчий, прорывающих интрузивные породы. Оруденение в основном штокверкового, менее брекчиевого типа. Размеры оруденелого штокверка – 750×250 м. Разведан штокверк до глубины 550 м, отдельными скважинами – до 800 м. Молибденит содержится в молибденит-кварцевых и молибденитовых прожилках, а также в виде тонкой вкрапленности в цементе брекчий. По данным разведки в контуре карьера до глубины 565 м подсчитаны запасы категорий C_1 и C_2 в количестве: молибден общий – 61,2; молибден сульфидный – 56,1 тыс. т при содержании соответственно 0,091 и 0,08 % и коэффициенте рудоносности 0,76 %. Забалансовые запасы по горно-техническим условиям вне контура карьера: молибден общий – 19,6; молибден сульфидный – 18,3 тыс. т с содержанием 0,085 и 0,08 %, коэффициент рудоносности – 0,63.

Мало-Ойногорское месторождение – комплексное (вольфрам-молибденовое), представляет собой рудный штокверк, локализованный в основных вулканитах и кремнистых породах с линзами гипербазитов хасуртинской толщи нижнего кембрия и в эндоконтактовых и надинтрузивных частях штокообразных тел гранит-порфиров поздне-палеозойского возраста. Рудный линейный штокверк представлен сетью разноориентированных прожилков кварц-молибденитового состава (иногда с пиритом) и молибденитового мономинерального состава, отдельными зонами с вкрапленным молибденитом. Прожилковые зоны и зоны с вкрапленным оруденением образуют рудную зону мощностью 250–520 м и протяженностью более 1,5 км. Минеральный состав руд: молибденит, пирротин, пирит, реже халькопирит, шеелит,



арсенопирит, сфалерит, магнетит, ильменит, галенит, буланжерит. Запасы молибдена категории A+B+C₁ составляют 154,9 тыс. т при среднем содержании 0,051 %. Запасы попутных компонентов составляют: WO₃ (шеелит) категории A+B+C₁ – 122,6 тыс. т при среднем содержании 0,04 %; рений категории A+B+C₁ – 2,5 т при среднем содержании 0,01 г/т. Месторождение относится к комплексным гидротермальным плутоногенным образованиям с колеблющимся K-Ag абсолютным возрастом от 320–304 до 293–283 млн лет. К сожалению, указанные крупные разведанные с подсчетом запасов молибдена месторождения по разным причинам до сих пор не эксплуатируются [11].

Цинк, свинец. В Республике Бурятия сосредоточено 48,8 % балансовых запасов цинка и 24,4 % запасов свинца Российской Федерации. Основные запасы категории A+B+C₁+C₂ – 29832,3 тыс. т цинка; 5006,5 тыс. т свинца – сосредоточены на Озёрном и Холоднинском колчеданно-полиметаллических месторождениях [8, 13]. Месторождения комплексные с высоким содержанием благородных металлов и редкоземельных элементов (золота, серебра, кадмия, скандия, бария, стронция, сурьмы, индия, таллия и других элементов).

Озёрное колчеданно-полиметаллическое месторождение приурочено к крупной Еравнинской вулканотектонической структуре, сложенной венд-раннекембрийскими осадочно-вулканогенными и субвулканическими

породами олдындинской свиты. В ней выделено десять рудных залежей пластической и линзовидной формы. Протяженность рудных тел – 1300–2340 м, размеры по падению – от 80 до 600 м. Мощность рудных тел колеблется от 1 до 30–50 м, в среднем она составляет 5–15 м. Оруденение прослеживается на глубину 200–300 м и более. Следует отметить, что пробуренная на глубину 1600 м разведочная скважина не вышла из рудоносной продуктивной толщи. Формирование колчеданно-полиметаллических руд сопряжено с гидротермально-метасоматическими процессами, связанными с деятельностью венд-кембрийских и ордовикских вулканов [13].

Руды месторождения представлены: сплошными, сложенными пиритом (70–75 %) и сфалерит-галенитом (6–7 %), рудами; полосчатыми (до 48,3 %) с чередованием полос пиритового и галенит-сфалеритового состава с содержанием свинца и цинка (10–20 %) рудами; брекчиевидными и вкрапленными рудами, составляющими около 35,9 %; колчеданно-сидеритовыми и сидеритовыми рудами (до 10 %). Кроме перечисленных руд на месторождении установлены зоны с сульфидно-полиметаллической и барит-сульфидно-полиметаллической минерализацией. В них помимо вышеперечисленных минералов присутствуют халькопирит, блеклая руда, барит, самородное золото и серебро. Запасы Озёрного месторождения (по состоянию на 1 января 2006 г.) приведены в табл. 3.

Таблица 3
Запасы Озёрного полиметаллического месторождения [15]

Table 3

Reserves of the Ozerny polymetallic deposit [15]

Полезные компоненты	Запасы по категориям			
	B	C ₁	C ₂	B+C ₁ +C ₂
Руда, млн т	19,4	105,9	9,8	135,1
Свинец, тыс. т	298	1166	100	1564
Цинк, тыс. т	1540	6180	550	8270
Сульфиды (сера), млн т	3,9	18	4	25,9



В пределах крупнейшего в России Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения Северо-Байкальского рудного района распространены в основном колчеданные и свинцово-цинковые руды в черносланцевой и карбонатно-сланцевых толщах, приуроченных к ондокской свите неопротерозоя. Залегание рудных тел субвертикальное и уходит на глубину от 250 до 1200 м и более. Запасы руды категории $B+C_1+C_2$ в Холоднинском месторождении составляют: цинка с содержанием 3,99 % – до 195 тыс. т, свинца с содержанием 0,6 % – 3359 тыс. т; серы с содержанием 21 % – 6996 тыс. т. (см. табл. 2). Холоднинское месторождение входит в состав перспективной Северо-Байкальской полиметаллической провинции, где выявлены свинцово-цинковые рудопроявления: Галенитовое, Калакачанское, Иокское, Рыбачье, Ондокское, Озёрное, Космонавтов, Авгольское, Большечуйское, Лосиное и др. [8, 18].

Кроме Озёрного и Холоднинского месторождений колчеданно-полиметаллического типа в Республике Бурятия имеются близкие по составу комплексные Назаровское и Октябрьское месторождения в Еравнинской зоне Западного Забайкалья. В рудах Назаровского золото-полиметаллического месторождения преобладают сфалерит, пирит, в промышленном количестве присутствует золото. Запасы месторождения: цинк категории C_1 – 170,5 тыс. т, категории C_2 – 214 тыс. т, золото категории C_2 – 7518 кг. В Октябрьском месторождении наряду с рудным свинцом и цинком обнаружено высокое содержание меди. В Намаминском золото-полиметаллическом месторождении Северного Прибайкалья присутствуют: золото – до 14 г/т; медь – 1,76–33,2 %; свинец – до 10 %; олово – до 3 %; сурьма – до 3 %; мышьяк – до 3 %; серебро – от 500 до 1500 г/т; повышенные содержания висмута, кадмия, германия [15].

Олово. Моховое месторождение олова находится на территории Муйского района Республики Бурятия и расположено в 115 км от железнодорожной станции Таксимо (Байкало-Амурская магистраль). Месторождение представляет новый геолого-промышленный тип – касситерит-микроклиновых метасоматитов в гранитах. Балансовые запасы месторождения утверждены протоколом Территориальной комиссии по запасам полезных ископаемых № 124 1995 г. и по категории C_2 составляют 1105 тыс. т руды и 12,66 тыс. т олова при содержании 1,15 %. Ресурсы Мохового месторождения категории P_1+P_2 составляют 1 413,5 тыс. т руды и 18,19 тыс. т олова, из которых по категории P_1 – 1105 тыс. т руды и 12,66 тыс. т олова, по категории P_2 – 308,5 тыс. т руды и 5,53 тыс. т олова. Месторождение по запасам относится к средним. На месторождении также расположено около 20 непроверенных аномалий, перспективных для выявления новых рудных тел. Кроме Мохового месторождения в бассейне р. Витим обнаружено несколько перспективных проявлений олова силикатно-сульфидной формации. Это Сайжеконтское рудопроявление, локализованное в контакте габброидов атарханского комплекса и известняков хойготской свиты неопротерозоя. Рудные тела – небольшой мощности (1,0–1,8 м) и протяженностью до 8 м. В руде установлены кристаллы рутила, магнетита, церуссита, скородита, смитсонита. Касситерит образует мелкую вкрапленность в кварцевых жилах. Содержание олова в жилах колеблется от 0,298 до 10 %. Подобные рудные тела с касситеритом обнаружены в бассейне р. Амалат с содержанием олова 0,63 % [15].

Медь. Впервые медь в Республике Бурятия обнаружена в массивах ультраосновных и основных пород с медно-никелевым оруденением. Так, в пределах Чайского и Йоко-Довыренского дунит-перидотитовых массивов установлены запасы меди соответственно 270



и 51,01 тыс. т. Кроме того, перспективными являются месторождения меди, относящиеся к медно-железо-скарновой, медно-порфировой и медно-колчеданной (с баритом) формациям. Основные запасы меди на территории Республики Бурятия сосредоточены в пределах полиметаллических месторождений: Холоднинского, Намаминского и Гундуйского с общими запасами категории C_2 127 тыс. т. Гундуйское медно-баритовое с полиметаллами месторождение находится на территории Еравнинского района Республики Бурятия, в 4 км южнее Озёрного месторождения. Балансовые запасы месторождения категории C_2 : 12757 тыс. т руды; 74,9 тыс. т меди и 4147 тыс. т барита. Среднее содержание меди составляет 0,59 %, барита – 32,5 %. Имеются прогнозные ресурсы категории P_1 на Аришкинском месторождении меди медно-колчеданного типа, которые составляют 370 млн т. Кроме того, имеется целый ряд проявлений медно-железо-скарновой формации, обнаруженных в Курбино-Еравнинском рудном районе (Турхульское, Ингисханское, Харасанское, Урса-Нурское и др.), которые требуют дополнительного изучения [15].

Никель. В Северо-Байкальском рудном районе выявлен целый ряд ультрабазит-базитовых массивов с сульфидным медно-никелевым оруденением (Чайский, Йоко-Довыренский, Авкитский, Гасан-Дякитский, Маринкинский и др.). Изучением этих массивов занимались многие исследователи производственных и научных организаций [18]. Чайский дунит-перидотит-габбро-норитовый мас-

сив расположен в зоне сочленения Кичеро-Мамского антиклинория с Олоkitским прогибом. Оруденение связано с пироксенитами. Разведанные запасы составляют: никеля – 260; меди – 86; кобальта – 10,7 тыс. т. Прогнозные ресурсы оценены следующим образом: никеля – 800; меди – 270; кобальта – 33 тыс. т. В пределах Маринкинского массива с возрастом 835 ± 12 млн лет выявлено богатое сульфидное медно-никелевое оруденение, приуроченное к центральной ультраосновной части массива. Как указывалось выше, с этими же массивами связано золотое и платинометалльное оруденение [8, 19].

Глиноземное сырьё (алюминий). Известные на территории Республики Бурятия объекты руд глиноземного сырья принадлежат трем генетическим типам: магматическому, осадочному и осадочно-метаморфогенному. К первому типу относятся палеозойские нефелинсодержащие и габбро-анортозитовые породы, ко второму – высокометаморфизованные докембрийские кристаллические сланцы, содержащие высокоглиноземистые минералы. Промышленную ценность представляют прежде всего нефелинсодержащие породы сайжинского комплекса (Мухальское и другие месторождения) в бассейне верхнего течения Витима и сыннырского комплекса в Северном Прибайкалье (Калюминское и Трехглавое месторождения).

Наиболее типичным месторождением глиноземного сырья являются нефелинсодержащие породы Мухальского месторождения (табл. 4).

Таблица 4

**Средние содержания основных компонентов
в рудах Мухальского месторождения, % [15]**

Table 4

**Average content of the main components
in the Mukhalsky deposit ores, % [15]**

Название породы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	K ₂ O	Na ₂ O	Силикатный модуль	Щелочной модуль
Уртиты и ийолит-уртиты	39,43	24,50	5,05	3,69	8,49	0,948	0,762
Ийолиты	38,74	15,72	13,48	2,59	4,77	1,951	0,705



По химическому составу и технологическим свойствам уртиты (26–29 %) и ийолит-уртиты (20–25 %) Мухальского месторождения соответствуют по содержанию Al_2O_3 нефелиновым рудам Кия-Шалтырского месторождения, на котором работает Ачинский глиноземный завод в Красноярском крае, однако по запасам они превышают Кия-Шалтырское более чем в три раза. В целом по месторождению запасы, включая прогнозные, оцениваются в 882 млн т. Большие запасы, высокое качество руд и незначительная удаленность от Озёрного рудного узла создают благоприятные условия для создания в Забайкалье нового центра минерально-сырьевой базы глиноземной промышленности на основе разработки нефелиновых руд Мухальского месторождения и расположенных в 25 км западнее Нижне-Бурульзайского и других массивов нефелинсодержащих пород (Инолоктинский, Гулхенский и др.). Месторождение сложено уртитами и ийолит-уртитами. Вмещающими являются осадочные и интрузивные породы, скрытые под покровом неогеновых базальтов. Химический состав уртитов Мухальского месторождения следующий, мас. %: 26,8–29,1 Al_2O_3 ; 37,3–41,8 SiO_2 ; 0,7–3,4 Fe_2O_3 ; 1,4–2,7 FeO ; 6,2–13,1 CaO ; 7,9–13,2 Na_2O ; 2,8–5,5 K_2O ; 0,1–0,7 TiO_2 ; 0,1–5,8 п.п.п. Особенностью химического состава является относительно высокое содержание в них галлия – 16–20 г/т [20].

В пределах Сыннырского плутона Северного Прибайкалья выявлены Калюминское и Трехглавое месторождения сынныритов как комплексного сырья для производства алюминия, редкоземельных элементов, калийных удобрений и цемента. В сынныритах наблюдаются высокие содержания K_2O (18,39 %) и Al_2O_3 (22,95 %). Запасы руд Калюминского месторождения категории C_2 составляют: K_2O – 123 и Al_2O_3 – 152 млн т. Прогнозные запасы – 1850 млн т. Прогнозные ресурсы месторождения Трехглавого оцениваются в 900 млн т. Со-

держание окиси калия – 162, глинозема – 190,8 млн т. Названные месторождения представляют уникальные по составу и запасам объекты, которые могут обеспечить рудой крупное горнодобывающее предприятие на долгие годы [21]. Второй тип проявления алюминия магматического месторождения представляет Могойский массив габброидов и анортозитов атарханского комплекса нижнего палеозоя. Массив имеет овальную форму, центральная часть его сложена анортозитами, а периферия – габбро-анортозитами. Зона анортозита вытянута на 2500 м при мощности 1200 м. Содержание Al_2O_3 составляет от 28,28 до 32,12 %. Прогнозные ресурсы глинозема составляют 640 млн т. Все это позволяет рассматривать Могойский массив как крупное месторождение глиноземного сырья. В Республике Бурятия имеется Боксонское месторождение осадочных бокситов в Окинском районе Восточного Саяна (максимальная мощность пластов – 25–30 м, содержание Al_2O_3 – 41,2 %). Высокоглиноземистый тип месторождений глинозема связан с древними осадочно-метаморфическими андалузит-силлиманитовыми сланцами (например, Кяхтинское проявление). Они широко распространены в Западном Забайкалье, но практического интереса не представляют.

Редкие и рассеянные металлы (бериллий, тантал, ниобий, кадмий, индий, таллий, германий, рений, уран)

Среди редких и рассеянных металлов стратегического минерального сырья в Республике Бурятия наибольший интерес представляют месторождения бериллия, урана, кадмия и редкоземельных элементов. Недавно в Республике Бурятия в пределах г. Улан-Удэ в карбонатитах обнаружено перспективное бастнезит-флюоритовое проявление Портовое с высоким (более 20 %) содержанием редкоземельных элементов лантан-цериевой группы. До 50 % данного проявления сложено бастнезитом,



оно входит в состав крупной Западно-Забайкальской редкоземельной карбонатитовой провинции. В ее пределах обнаружена комплексная редкоземельно-барий-стронциевая минерализация, связанная с карбонатитами халютинского комплекса раннего мела. Богатое рудопроявление редкоземельных элементов Портовое, расположенное в экономически освоенном районе, требует экстренного проведения поисково-разведочных работ [22, 23].

Бериллий. В пределах Республики Бурятия уникальными по крупности объектами бериллия являются Ермаковское и расположенное рядом с ним Оротское месторождения, а также средние по размерам Снежное, Урминское, Амандакское и Ауникское комплексные месторождения.

Ермаковское фенакит-берtrandит-флюоритовое месторождение расположено в Селенгинском рудном районе. На месторождении установлено 24 рудных тела линзовидной формы, образующих 19 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 со средним содержанием 1,19 % и 362 тыс. т CaF₂. Близкий состав имеют руды Оротского берtrandитового месторождения [17, 24].

В пределах Окинского района Восточного Саяна открыто и разведано Снежное комплексное бериллиевое и тантал-ниобиевое месторождение [9].

Главными промышленными минералами являются фенакит и берилл, а также флюорит (до 25–30 %), иногда он образует мономинеральные скопления. Им сопутствуют биотит, полевые шпаты (микроклин, реже олигоклаз и альбит), кальцит, в переменном количестве кварц, присутствуют сульфиды (пирит, халькопирит, молибденит, реже галенит, козалин, сфалерит), а также отмечаются редкие выделения берtrandита и бавенита. Содержание бериллия в рудах неравномерное и колеблется от 4620 до 93480 г/т.

На территории Селенгинского рудного района выявлен Таширский рудный узел, включающий среднее по масштабам Урминское гелвин-берtrandитовое месторождение. В его пределах 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 – гелвин. Среднее содержание BeO в рудных телах варьирует от 0,131 до 0,852 %.

В Баунтовском рудном районе промышленный интерес представляют Амандакское и Ауникское месторождения и ряд перспективных рудопроявлений флюорит-фенакит-берtrandитового типа. В пределах Амандакского месторождения выявлено несколько рудных зон протяженностью от 130 до 500 м и шириной от 6 до 40 м. Они сосредоточены в осадочных породах девона-карбона Багдаринского прогиба и прорывающих их граносиенитах позднепалеозойского возраста. Промышленный интерес представляют пять рудных тел, сложенных флюоритом, фенакитом, берtrandитом, торитом, редкоземельными минералами иттриевой группы, галенитом, сфалеритом, редко молибденитом и касситеритом. Прогнозные ресурсы BeO категории P₂ составляют 8,5 тыс. т. На близлежащем Ауникском месторождении широко проявлена сульфидная стадия с образованием молибденита. Запасы BeO кате-



гории C_1 – 4285, C_2 – 9278 т при среднем содержании в руде 0,18 и 0,16 %, флюорита категории C_2 – 233 тыс. т. Флюорит-берtrandитовые проявления обнаружены в верховье р. Кудун, в Домнинской и Кадахтинской рудных зонах Еравнинского района [15].

Тантал, ниобий. Богатое тантал-ниобиевое оруденение выявлено в восточной части рудного поля Снежного месторождения бериллия Окинского рудного района Восточного Саяна [9]. Оно пространственно разобщено с бериллиевым. Минеральный состав руд: кварц – от 10 до 40 %, альбит – от 35 до 85 %; второстепенные и редкие минералы: биотит, мусковит, микроклин и олигоклаз, а также танталит, пирохлор, циртолит, апатит, бастнезит, торит, ураноторианит, ферриторит, малакон, монацит, циркон, флюорит, касситерит. Содержание ниобия колеблется от 700 до 1500, тантала – от 300 до 700 г/т, также отмечаются повышенные содержания циркония – до 4370, свинца – до 2640, гафния – до 423 и тория – до 944 г/т. Тантал-ниобиевая минерализация отмечается в альбититах Амандакского месторождения бериллия Баунтовского рудного района, где она ассоциирует с образованием редких земель иттриевой и цериевой групп. Отдельный интерес представляет Ингурское проявление редкоземельно-редкометалльных метасоматитов, связанных с интрузией морион-гранитов позднепалеозойского возраста. В микроклиновых метасоматитах обнаружены следующие рудные минералы: пирохлор-гатчеттолит, циркон, малакон, торит. Содержание, %: Ta_2O_5 – 0,7; Nb_2O_5 – 0,01–7; TR_2O_3 – 0,02–1,2; уран – до 3; торий – до 0,3. Присутствуют примеси бериллия и олова. Предварительно оцененные запасы (тантала и ниобия) Амандакского месторождения невелики.

В пределах Курбино-Еравнинского рудного района имеются определенные перспективы на выявление тантал-ниобия и других редких и редкоземель-

ных элементов. Здесь обнаружены альбит-амазонит-колумбитовые проявления Баха-Горхон, Шара-Кундуй, Шулингинское. Содержание колумбита на Баха-Горхоне – 130–629 г/т, на Шара-Кундуйе – 1,18 кг/т. Наиболее интересно Кыджимитское проявление с содержанием иттрия – 0,1; иттербия – 0,003; лантана – 0,03; урана – 0,02 %. Редкоземельная формация цериевой группы генетически связана со становлением щелочных и ультракислых интрузий. На Барун-Субинском и Горелом проявлениях в гранит-порфирах установлено: циркония – 0,2–1; ниобия – 0,003–0,05; иттрия – 0,01–0,3; тантала – 0,01–0,5; олова – 0,002–0,03 %. Гидротермально-метасоматические проявления редких земель и редких элементов известны на апатит-магнетитовых месторождениях Гурвунур, Северный Гурвунур, на проявлениях Восточная Эгита и Горхон [15]. В настоящее время все эти проявления должны быть доизучены в связи с разработкой программы стратегического минерального сырья России.

Кадмий, индий, таллий. В Республике Бурятия имеются крупные запасы кадмия категории $A+B+C_1+C_2$ в количестве 59778,3 т. Они сосредоточены в основном на колчеданно-полиметаллических месторождениях (Озёрное, Холоднинское, Джидотское и др.), где кроме кадмия и серебра присутствуют индий, висмут, таллий, сурьма, селен, мышьяк. Подсчитанные прогнозные запасы по этим месторождениям индия и висмута, которые содержатся в сфалеритовых рудах, составляют соответственно 216,6 и 384,5 т. Запасы таллия составляют 95,9 % от общероссийских. В Йоко-Довыренском дунит-троктолит-габбровом плутоне в массивных медно-никелевых рудах с высоким содержанием золота и платиноидов также обнаружены элементы: серебро – до 23,2; селен – до 23; теллур – до 14 г/т. Запасы по ним не подсчитывались.

Германий. Германий концентрируется в месторождениях многих метал-



лов: в сульфидных рудах цветных металлов, в железных рудах, в хромите, магнетите, рутиле и др. В Республике Бурятия германий категории P_1 в количестве 508 т обнаружен в полиметаллическом Озёрном месторождении совместно с кадмием (4975 т) в сфалеритовых рудах. Подобные перспективные проявления германия имеются на Наманском золото-полиметаллическом месторождении, а также на Эландинском месторождении бурового угля с содержанием германия до 130 г/т в пределах Баунтовского рудного района [15].

Рений. Основным источником рения служат молибденовые и медно-молибденовые руды порфировых месторождений, из которых его извлекают как попутный компонент. В этих рудах содержание рения варьирует от 0,01 до 1 г/т. В Республике Бурятия высокие содержания рения обнаружены при разведке Ореkitканского и Мало-Ойногорского крупных молибденовых месторождений, где по двум месторождениям обнаружены запасы рения категории $A+B+C_1$ в количестве 216,6 т при среднем содержании 0,01 г/т. Кроме того, прогнозные ресурсы рения категории P_2 в количестве 200 т сосредоточены в инфильтрационно-урановых месторождениях в пределах Витимского урановорудного района. Необходимо дальнейшее изучение условий формирования и запасов рения в этих рудах, особенно при планируемой отработке этих месторождений [1, 25].

Уран. Республика Бурятия располагает значительными ресурсами урана, составляющими четвертую часть общероссийских. По оценке Управления по недропользованию по Республике Бурятия и Байкальского филиала «Сосновгеология» ФГУП «Урангео», запасы урана по Хиагдинскому и Имскому месторождениям составляют не менее 92 тыс. т урана категории C_2 . Ожидаемые активные прогнозные ресурсы категории $P_1+P_2+P_3$ составляют 357 тыс. т урана. Основу урановорудного потенциала со-

ставляет Витимский урановорудный район – наиболее крупный рудный район в России с подготовленным к освоению Хиагдинским рудным полем в гидрогенных месторождениях, локализующихся в нелитифицированных отложениях кайнозойских впадин (палеодолин). Хиагдинское рудное поле включает восемь комплексных месторождений урана и редких земель (Хиагдинское, Источное, Количикан, Коретконде, Намару, Дыбрын, Тетрахское и Вершинное). Запасы урановых руд собственно Хиагдинского месторождения на 1 августа 2002 г. по категории $B+C_1+C_2$ составляли 21772,4 тыс. т при содержании урана 0,052 %, запасы урана по этой же категории – 11277 т.

Имское месторождение урана расположено в северо-западной части Мало-Амалатской грабенообразной впадины. Рудовмещающие аркозовые песчаники, хлидолиты, алевролиты, аргиллиты, углистые сланцы пролювиально-аллювиальной и озерной фаций кайнозоя обогащены углефицированной органикой, битумами, сульфидами железа. В рудах присутствуют урановые черны, настуран, коффинит, фосфаты и молибдаты урана. Месторождение предварительно разведано. Запасы урана категории C_1 – 3632 т при среднем содержании 0,063 %, категории C_2 – 23553 т при среднем содержании 0,059 %, ресурсы категории P_1 – 5029 т при среднем содержании 0,082 %. Общая оценка – 32,2 тыс. т. В забалансовых убогих рудах находится 59886 т при среднем содержании 0,026 %. Таким образом, общие геологические запасы урана по двум месторождениям составляют 92 тыс. т. Помимо этого, достаточно высоко оценивается потенциал урановорудных районов республики: Селенгинского, Еравнинского, Курба-Витимканского и Джидинского [2, 25].

Чистые и особо чистые виды кварцевого сырья

Потребность отечественной промышленности в кварцевом концентрате



высокой чистоты определена в объеме 15 тыс. т в год. Дальнейшее освоение этой отрасли весьма перспективно в связи с развитием волоконной оптики, солнечной энергетики, электронной промышленности и фундаментальных современных технологий.

Республика Бурятия имеет все предпосылки, чтобы стать важнейшим производителем и экспортером поликристаллического кремния и автономных систем энергоснабжения в объеме до 1/3 мирового оборота. На ее территории расположено несколько крупнейших месторождений гранулированного кварца и кварцитов (Чулбонское, Бурал-Сардыкское, Черемшанское, Гоуджекитское, Атарханское).

Чулбонское месторождение гранулированного кварца расположено в Баян-Ульском рудном районе. Содержание кремнезема в рудоразборном кварце составляет 99,8 %, коэффициент светопропускания – 30–60 %, содержание примесей – первые сотые и тысячные доли процента. Запасы прозрачного жильного кварца на месторождении составляют: по категории C_1+C_2 – 758,7; C_1 – 429,1 и C_2 – 329,6 тыс. т. Кварцевая крупка, полученная из кварца этого месторождения, по ТУ 41-07-008-82 относится ко второму-третьему сортам. Кварц пригоден для использования в светотехнической промышленности при производстве люминесцентных, галогенных и других ламп.

Бурал-Сардыкское кварцитовое месторождение находится в Окинском районе Восточного Саяна и является одним из крупных источников кварцевого сырья Сибири. Оно разведано и представлено мономинеральными белыми, светло-серыми (до прозрачных) химически чистыми кварцитами – «суперкварцитами», в которых содержание суммы элементов-примесей во многих пробах не превышает 12–50 ppm (10–4 %), что соответствует по ТУ-5726-002-11496665-97 кварцевым концентратам высокой чистоты для оптического стекловарения,

изготовления кварцевой керамики. Изучение серых, темно-серых разностей микрокварцитов показало, что они пригодны для получения кремния «солнечного» качества.

Черемшанское месторождение расположено в Прибайкальском районе, в 60 км от г. Улан-Удэ и в 40 км от ст. Татаурово Восточно-Сибирской железной дороги. Оно представлено единым протяженным (более 10 км) пластом белых мономинеральных кварцитов и кварцитовидных песчаников мощностью от 30 до 50 м. Белые, желто-белые кварцитовидные песчаники состоят из зерен кварца (99,2 % свободного кремнезема), не имеющих газово-жидких и минеральных включений. Вредные примеси (0,7–1,0 %) представлены окислами железа, которые легко удаляются. По вещественному составу, минералогическим особенностям и физическим параметрам кварцитовидные песчаники относятся практически к единому технологическому типу, удовлетворяющему требованиям промышленности для производства технического кремния, карбида кремния и ферросилиция. В последние два-три года производятся работы по изучению возможности использования наиболее чистых разновидностей кварцитов для наплава однокомпонентного кварцевого стекла, получения высокочистого кремния для солнечной энергетики, а также выращивания монокристаллов пьезокварца [4, 8, 17].

Плавиковошпатовое сырье (флюорит)

На территории Республики Бурятия выявлено около 150 месторождений и рудопроявлений флюорита. Запасы руды плавикового шпата составляют 13 % от общероссийских. В перспективе в России и в мире ожидается рост потребности в плавиковошпатовом сырье в связи с увеличением доли электроконверторного способа производства стали. Балансовые запасы месторождений плавикового шпата Республики Бурятия способны обеспечить нужды ме-



таллургических предприятий Сибири и Дальнего Востока в кусковом флюорите. Месторождения и проявления относятся к гидротермальному постмагматическому генетическому типу флюорит-кварцевой аргиллизитовой рудной формации и характеризуются близкими чертами геологического строения, качеством и технологическими свойствами руд. Наибольшее количество месторождений и проявлений флюорита находится в экономически освоенном Селенгинском рудном районе (Эгитинское, Наранское, Нижне-Чикойское и др.). Общие разведанные запасы флюоритовых руд категории А+В+С₁ составляют 1621 тыс. т при среднем содержании 31,15 %. Большие запасы флюорита содержатся также в комплексных флюорит-бериллиевых месторождениях (Ермаковское, Амандакское и др.) [17, 26].

Фосфатное сырье (апатиты)

В Республике Бурятия, кроме небольших осадочных месторождений фосфоритов (Ухагольское, Харанурское) в Восточном Саяне, разведано крупное Ошурковское месторождение апатитовых (фосфорных) руд в экономически освоенном районе – вблизи г. Улан-Удэ. Ошурковское месторождение представляет собой массив субщелочных габброидов площадью 12 км², имеющий в плане близкую к изометричной форму. Рудным телом является большая часть массива. Апатит на Ошурковском месторождении является одним из главных породообразующих минералов, его содержание колеблется от 3–4 до 15–20 %. Повышенные концентрации апатита наблюдаются в меланократовых мелко- и среднезернистых разновидностях пород. В пределах массива выделяется несколько участков шириной от 100 до 400 м и протяженностью до 500–600 м с содержанием Р₂О₅ 5–6 %, образующих полосу шириной 500–600 м, протягивающуюся через центральную часть массива на 2–2,5 км. Суммарные запасы категории А+В+С₁ до глубины 200 м составляют 108,6 млн т Р₂О₅ при среднем

содержании 3,8 %, бортовом содержании 2,5 %, минимальном промышленном содержании 3,6 %. Прогнозные ресурсы категории Р₁ до глубины 500 м составляют 137 млн т Р₂О₅. На базе утвержденных запасов первой очереди строился Забайкальский апатитовый завод, закрытый на стадии строительства обогатительной фабрики из-за возможного ухудшения экологической обстановки. Однако в настоящее время представляется целесообразным вернуться к детальной проработке вариантов разработки крупного Ошурковского месторождения дефицитного для России фосфатного сырья (апатитов) на основе новых природосберегающих технологий добычи и обогащения руд, прогрессивных решений организации производства и современных методов утилизации отходов [4, 27].

Перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Республики Бурятия

В последние десятилетия в пределах Республики Бурятия производилась добыча только востребованных (ликвидных) полезных ископаемых: золота, плавленого шпата, бурого и каменного угля, нефрита, урана, цементного сырья, вольфрама и ряда других полезных ископаемых. До начала 1990-х гг. на территории республики кроме золотодобывающих функционировали 16 крупных горнодобывающих предприятий, не считая большого количества производств по добыче общераспространенных полезных ископаемых. В дальнейшем в рамках реализации Федерального закона № 27 от 27 января 2007 г. по вопросам социально-экономического развития восточных регионов Российской Федерации по Республике Бурятия были разработаны специальные мероприятия по развитию минерально-сырьевых ресурсов, строительству горно-промышленных комплексов (ГПК) и горно-обогатительных комбинатов (ГОК) в период 2008–2020 гг. [2, 4]. Однако эти мероприятия до сих пор не проведены и планы их проведе-



ния нуждаются в корректировке в связи с переходом Республики Бурятия в Дальневосточный федеральный округ и появлением новых возможностей для получения инвестиций из федерального бюджета и коммерческих организаций.

Ниже приводится характеристика ранее и вновь планируемых ГПК и ГОК на территории Республики Бурятия с добавлением новых материалов, полученных нами по Программе фундаментальных научных исследований Президиума Российской академии наук № 1.4П «Месторождения стратегического минерального сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче», 2015–2017 гг. (координаторы программы академик Н.С. Бортников, академик В.А. Чантурия). В последние годы нами был выполнен большой объем геолого-геофизических и прогнозно-металлогенических исследований по изучению Северо-Байкальского, Баунтовского, Курбино-Еравнинского, Окин-ского, Джидинского и Селенгинского рудных районов Республики Бурятия. Произведена оценка и даны перспективы освоения минерального сырья, преж-

де всего стратегического [5, 8, 9, 11, 13, 17].

Северо-Байкальский рудный район рассматривается как крупный промышленный узел минерально-сырьевого профиля, который в будущем может стать основой для формирования Западного (Северо-Байкальского) и Восточного (Муйского) ГПК, а также строительства в их пределах следующих ГОК: Холоднинского (свинец, цинк, золото), Йоко-Довыренского (медь, никель, золото, металлы платиновой группы), Чайского (никель, кобальт, медь), Ирокиндинского и Каралонского (золото), Молодежного (асбест, золото), Сыннырского (ультракалийно-глиноземное сырье, редкоземельные элементы), Мохового (олово), Витимконского (титан), Чулбонского (кварцевое сырье), а также других ГОК Северо-Байкальского территориально-промышленного комплекса в зоне хозяйственного освоения Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (рис. 2).

Южнее, в пределах Баунтовского рудного района планируется формирование Ореkitканского, Хиагдинского, Мухальского ГОК. В этом районе наиболее



Рис. 2. Схема размещения планируемых горно-обогатительных комбинатов в Северо-Байкальском и Баунтовском рудных районах [2, 8] с дополнением
Fig. 2. Allocation scheme for the planned ore mining and dressing plants in the North Baikal and Bauntovsky ore districts [2, 8], updated



крупным объектом является Ореkitканское молибденовое месторождение с запасами сырья мирового уровня. Реализация на долгосрочную перспективу мероприятий по воспроизводству и эксплуатации месторождений стратегического сырья, проводимых за счет средств федерального бюджета и инвестиционных проектов, должна привести к созданию крупного Хиагдинского ГОК на базе Хиагдинского и Имского месторождений урана с возможным включением в эксплуатацию близко расположенных месторождений золота, бериллия и других полезных ископаемых (скандий, торий, иттрий, лантан, германий и др.). В бассейне р. Витим на базе Мухальского нефелинсиенитового и других месторождений алюминия, а также Сириктинского проявления высококачественных флюсовых известняков возможно строительство крупного комбината по производству глинозема, редких земель, в том числе галлия.

В пределах Курбино-Еравнинского рудного района планируется создание Восточно-Бурятского ГПК и строительство Озёрного ГОК. Здесь сосредоточены довольно многочисленные месторождения разнообразных полезных ископаемых, в том числе стратегических минеральных ресурсов: Озёрное, Ульзутуйское и Звёздное колчеданно-полиметаллические, Гундуйское и Туркульское медно-баритовые, Аришинское медно-железорудное, Назаровское золото-полиметаллическое, боро-железорудное месторождение Солонго, Гурвунурское редкоземельно-апатит-железорудное, Октябрьское железо-марганцевое, россыпные месторождения золота. Кроме перечисленных выше месторождений в непосредственной близости от Озёрнинского рудного узла имеются месторождения вольфрама (Оланское), флюорита (Эгитинское) и полиметаллов (Доваткинское). По приблизительной оценке стоимость всех известных месторождений Озёрнинского рудного узла составляет 19015 млн долл. Перспекти-

вы промышленного освоения Курбино-Еравнинского и Баунтовского рудных районов регулируются стратегией экономического развития Дальневосточного федерального округа Российской Федерации и базируются в первую очередь на освоении стратегического сырья вдоль проектируемой железной дороги, соединяющей ветку Восточно-Сибирской железной дороги с веткой Байкало-Амурской магистрали от ст. Могзон до ст. Новый Уоян.

В пределах Джидинского рудного района планируется создать Закаменский ГПК на базе неосвоенных рудных объектов ранее существовавшего Джидинского вольфрамо-молибденового ГОК. Здесь известны месторождения: молибдена (Первомайское), молибдена и вольфрама (Мало-Ойногорское, Булуктаевское), вольфрама (Инкурское, Холтосонское), золота (Водопад, Сарлам), флюорита (Хурайское), редких земель (Битуджидинское). В связи с этим возникает необходимость реанимации добычи вольфрам-молибденовых и других месторождений бывшего крупного Джидинского комбината. Данный комбинат, прекративший выпуск концентрата с 1997 г., в настоящее время за счет Инкурского и Холтосонского месторождений в балансе запасов вольфрама России составляет 14,4 %, а с учетом запасов вольфрама в лежалых хвостах – около 25 %. По обеспеченности запасами он уступает только Тырнаузкому комбинату, но превосходит его по содержанию WO_3 и качеству руд [11].

В Селенгинском рудном районе планируется создать Центральный ГПК с возможным строительством нескольких ГОК. В данном районе распространены месторождения: молибдена (Жарчихинское, Колобковское, Брянское, Харитоновское, Новопавловское), бериллия (Ермаковское), титана (Арсентьевское), редких земель (рудопоявления Халютинское, Портовое), плавикового шпата (Третьяковское, Наранское, Ара-Таширское), цементного сырья (Билютинское,



Тарабукинское), апатита (Ошурковское), кварцитов (Черемшанское), перлитов и цеолитов (Мухор-Талинское). Следует отметить, что на крупнейшем в России Ермаковском флюорит-бериллиевом месторождении на 1 января 1997 г. было отработано только 37 % от общих запасов бериллия. 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 [2, 6].

Восточно-Саянский ГПК планируется создать в пределах Окинского рудного района на базе действующих ГОК Холбинской группы золоторудных месторождений. В рудном районе в настоящее время продолжается отработка крупного Зун-Холбинского месторождения, работает рудник и золотоизвлекательная фабрика, ведется изучение его глубоких горизонтов. В разной мере вовлечены в отработку другие золоторудные месторождения, локализованные в пределах Гарганской глыбы и ее северного обрамления: Барун-Холбинское, Владимирское, Зун-Оспинское, Коневинское. Кроме того, здесь сосредоточены довольно многочисленные месторождения разнообразных полезных ископаемых: графита (Ботогольское), асбеста (Ильчирского), бериллия и тантало-ниобатов (Снежное), лития и редкоземельных элементов в пегматитах (Урикское), кварцевого сырья (Бурал-Сардыкское), бокситов (Боксонское), фосфоритов (Харанурское, Ухогольское) и др. Прогнозные ресурсы золота в пределах Окинского рудного района, составной частью которого является Восточно-Саянский ГПК, оцениваются в 1360 т [28]. В настоящее время этот район реально рассматривается как потенциально крупный промышленный узел минерально-сырьевого профиля, который в будущем может стать основой для формирования Окинского террито-

риально-промышленного комплекса Восточной Сибири [9].

Заключение

Таким образом, из приведенного материала по имеющимся минерально-сырьевым ресурсам можно увидеть, что Республика Бурятия обладает значительным объемом металлов, прежде всего стратегических, которые, несмотря на некоторые неблагоприятные факторы в мировой и российской экономике, способны обеспечить потребности некоторых отраслей высокотехнологичной промышленности Российской Федерации в настоящем и ближайшем будущем.

В усилении позиции Республики Бурятия в геополитическом и экономическом пространстве России и стран Азиатско-Тихоокеанского региона решающую роль играет наращивание ее минерально-сырьевого потенциала, а стратегическим направлением ее перспективного развития является освоение минеральных ресурсов. Для этого прежде всего необходимо усилить поисково-оценочные, геолого-разведочные и научно-исследовательские работы в регионе с целью ускоренной подготовки для эксплуатации уже имеющихся и вновь выявленных месторождений стратегических металлов в новых экономических условиях, сосредоточить инвестиционно-финансовые средства государства и бизнеса на стимулировании добычи высоколиквидных и остродефицитных ресурсов минерального сырья в пределах ГПК, на строительстве инфраструктуры (дорог, социальных объектов и пр.) и крупных ГОК в экономически перспективных рудных районах Республики Бурятия.

Это, прежде всего, Северо-Байкальский рудный район как крупный промышленный узел минерально-сырьевого профиля, расположенный в зоне хозяйственного освоения Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Здесь разведаны крупные комплексные месторождения золота, платины, меди, никеля, кобальта, свинца, цинка, титана,



редких и редкоземельных элементов, хризотил-асбеста, кварцевого и глиноземного сырья. Большие запасы минерального сырья и его востребованность на рынке являются основанием для проектирования и строительства Холоднинского, Йоко-Довыренского, Чайского, Сыннырского ГОК в верховье р. Чая и Левая Мама, то есть за пределами центральной зоны Байкальской природной территории. Остальные включенные в проект комбинаты Баунтовского, Курбино-Еравнинского Джидинского и Окинского рудных районов (Озёрный, Хиагинский, Орехитканский, Мухальский, Ермаковский, Закаменский, Зун-Оспинский и др.) не затрагивают Центральную зону Байкальской природной территории и могут в дальнейшем активно развиваться, осваивая высоколиквидные разведанные и новые месторождения полезных ископаемых. Для долгосрочной перспективы освоения природных богатств Западного Забайкалья необходимо строительство железной дороги от ст. Могзон Восточно-Сибирской железной

дороги до ст. Новый Уоян Байкало-Амурской магистрали, а также строительство крупной Мокской гидроэлектростанции на р. Витим в Северо-Байкальском административном районе.

Рациональное использование минеральных ресурсов является главной основой развития экономики Республики Бурятия. Их освоение предполагает не только добычу, переработку и транспортировку ресурсов, но и проведение широкого комплекса хозяйственных мероприятий, в том числе в области природоохранной деятельности. Эффективность социально-экономического развития республики напрямую зависит от степени отработки всей производственной цепочки от добычи полезных ископаемых до получения конечного продукта, внедрения современных технологий, подготовки высококвалифицированных кадров и развития интеллектуального потенциала населения. Это гарантирует наиболее высокий уровень отдачи от вложенных инвестиций [2, 4, 7].

Библиографический список

1. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В. [и др.]. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119. <https://doi.org/10.7868/S0016777016020027>
2. Бахтин В.И., Ялович Г.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Бурятия до 2020 г. // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 6–15.
3. Михайлов Б.К., Петров О.В., Кимельман С.А., Ледовских А.А., Бавлов В.Н., Воробьев Ю.Ю. [и др.]. Богатство недр России: минерально-сырьевой и стоимостной анализ. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 484 с.
4. Ялович Г.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Бурятия до 2020 года // Глобус: геология и бизнес. 2010. № 5 (13). С. 14–29.
5. Гордиенко И.В., Булгатов А.Н., Орсов Д.А. Геодинамические обстановки и металлогения Саяно-Байкальской горной области // Отечественная геология. 2013. № 3. С. 7–15.
6. Таханова С.С. Управление недрами Республики Бурятия // Разведка и охрана недр. 2017. № 9. С. 3–10.
7. Дондоков З.Б.-Д., Потапов Л.В., Кислов Е.В. Основные направления и проблемы развития минерально-сырьевого сектора Республики Бурятия // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 137–145.
8. 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.
9. Гордиенко И.В., Роцектаев 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>
10. Орсов Д.А. Анортозиты малосульфидного платиноносного горизонта (Риф I) в верхнерифейском Йоко-Довыренском массиве



(Северное Прибайкалье): новые данные по составу, ЭПГ-Cu-Ni минерализации, флюидному режиму и условиям образования // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 4. С. 15–43. <https://doi.org/10.31857/S0016-777061415-43>

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

12. Орсов Д.А., Очилов Ю.Ч., Миронов А.Г., Дамдинов Б.Б., Жмодик С.М. Минералы платиновых металлов и типы их ассоциаций в золотоносных россыпях Саяно-Байкальской складчатой области (территория Бурятии) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 3. С. 335–346.

13. 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>

14. Нефедьев М.А. Объемная модель и оценка перспектив Озернинского рудного узла по геофизическим данным (Западное Забайкалье). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 184 с.

15. Фишев Н.А., Шелгачев К.М., Игнатович В.И., Гусев Ю.П., Минина О.Р., Шатковская Л.В. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист N-49 – Чита. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 604 с.

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

17. Гордиенко И.В., Бадмацыренова Р.А., Ланцева В.С., Елбаев А.Л. Селенгинский рудный район Западного Забайкалья: структурно-минерагеническое районирование, генетические типы месторождений и геодинамические условия их образования // Геология рудных месторожде-

ний. 2019. Т. 61. № 5. С. 3–36. <https://doi.org/10.31857/S0016-77706153-36>

18. Шобогоров П.Ч. О Северо-Байкальской колчеданно-полиметаллической провинции // Материалы по минералогии, геохимии и петрографии Забайкалья. Вып. 3. Улан-Удэ: Бурятское книжное издательство, 1971. С. 3–10.

19. Конников Э.Г., Цыганков А.А., Орсов Д.А. Чайское медно-никелевое месторождение // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 1. М.: Геоинформарк, 1995. С. 39–47.

20. Шаракшинов А.О. Мухальское месторождение – новый генетический тип нефелиновых пород // Геология рудных месторождений. 1984. № 1. С. 89–92.

21. Нефедьев М.А. Сынныриты – новое комплексное сырье для получения алюминия и калийных удобрений (Северное Прибайкалье) // Минерагения северо-восточной Азии: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Экос, 2011. С. 111–113.

22. Рипп Г.С., Кобылкина О.В., Дорошкевич А.Г., Шаракшинов А.О. Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2000. 224 с.

23. Рипп Г.С., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Дорошкевич А.Г., Хромова Е.А. Новый тип редкоземельного оруденения в Западном Забайкалье // Отечественная геология. 2018. № 3. С. 9–21.

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

25. Самович Д.А. Витимский промышленный урановорудный район // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 21–32.

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

27. Андреев Г.В., Гордиенко И.В., Кузнецов А.Н., Кравченко А.И. Апатитоносные диориты юго-западного Забайкалья. Улан-Удэ: Бурятское книжное издательство, 1972. 200 с.

28. Михайлов Б.К., Иванов А.И., Вартанян С.С., Беневольский Б.И. Проблемы минерально-сырьевой базы золота России // Руды и металлы. 2015. № 1. С. 93–99.

References

1. Bortnikov NS, Volkov AV, Galyamov AL, Vikent'ev IV, Aristov VV, Lalomov AV, et al. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2016;58(2):97–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016777016020027>

2. Bakhtin VI, Yalovik GA. Current state and prospects of the mineral-raw base of Buryat Republic until to 2020. *Razvedka i okhrana nedr* = Prospect and protection of mineral resources. 2007;12:6–15. (In Russ.)

3. Mikhailov BK, Petrov OV, Kimel'man SA, Ledovskikh AA, Bavlov VN, Vorob'ev YuYu, et al. *Mineral wealth of Russia. Mineral and raw material cost analysis*. Saint Petersburg: A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute; 2008. 484 p. (In Russ.)

4. Yalovik GA. State and prospects for the development of the mineral-raw base of Buryatia until 2020. *Globus: geologiya i biznes*. 2010;5:14–29. (In Russ.)

5. Gordienko IV, Bulgatov AN, Orsoev DA. Geodynamics of settings and metallogenics of the



Sayan-Baikal mountains region. *Otechestvennaya geologiya*. 2013;3:7–15. (In Russ.)

6. Takhanova SS. The management of mineral resources of Republic of Buryatia. *Razvedka i okhrana nedr* = Prospect and protection of mineral resources. 2017;9:3–10. (In Russ.)

7. Dondokov ZB-D, Potapov LV, Kislov EV. Priority directions and problems in the development of the mineral and raw material sector in the Republic of Buryatia. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2019;1:137–145. (In Russ.)

8. Gordienko IV, Bulgatov AN, Nefedyev MA, Orsoev DA. 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 of the Russian Academy of Natural Sciences. *Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2014;2:5–18. (In Russ.)

9. Gordienko IV, Roshchektaev PA, Gorokhovskii DV. Oka ore district, the Eastern Sayan: geology, structural-metallogenic zonation, genetic types of ore deposits, their geodynamic formation conditions, and prospects for development. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2016;58(5):405–429. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S001677701605004X>

10. Orsoev DA. Anorthosites of the low-sulfide platiniferous horizon (Reef I) in the upper riphean Yoko-Dovyren massif (Northern Cisbaikalia): new data on the composition, PGE-Cu-Ni mineralization, fluid regime and formation conditions. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2019;61(4):15–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016-777061415-43>

11. Gordienko IV, Gorokhovskii DV, Smirnova OK, Lantseva VS, Badmatsyrenova RA, Orsoev DA. Dzhiba ore district: geology, structural and metallogenic zonation, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecast, and prospects for development. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2018;60(1):3–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>

12. Orsoev DA, Ochirov YuCh, Mironov AG, Damdinov BB, Zhmodik SM. Minerals of platinum metals and types of their associations in gold placers of the Sayan-Baikal folded region, Buryatia. *Geologiya i geofizika*. 2004;45(3):335–346. (In Russ.)

13. Gordienko IV, Nefed'ev MA. Kurba-Eravna ore district, Western Transbaikalia: geological and geophysical structure, types of ore deposits, predictive assessment, and mineral-resource potential. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2015;57(2):114–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016777015020021>

14. Nefed'ev MA. *Ozerninsky ore cluster Western Transbaikalia: volumetric model and assessment of the prospects based on geophysical data*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre of Siberian

Department of Russian Academy of Sciences; 2009. 184 p. (In Russ.)

15. Fishev NA, Shelgachev KM, Ignatovich VI, Gusev YuP, Minina OR, Shatkovskaya LV, et al. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Aldan-Transbaikalia series. Sheet N-49 – Chita. Explanatory Note*. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI; 2011. 604 p. (In Russ.)

16. Ignatovich VI. Mineral base of molybdenum. *Razvedka i okhrana nedr* = Prospect and protection of mineral resources. 2007;12:37–43. (In Russ.)

17. Gordienko IV, Badmatsyrenova RA, Lantseva VS, Elbaev AL. Selenga ore district in Western Transbaikalia: structural and mineragenetic zoning, genetic types of deposits and geodynamic settings of ore localization. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2019;61(5):3–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016-77706153-36>

18. Shobogorov PCh. Northern Baikal pyrite-polymetallic province. In: *Materialy po mineralogii, geokhimii i petrografii Zabaikal'ya* = Materials on mineralogy, geochemistry and petrography of Transbaikalia. Iss. 3. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1971. p.3–10. (In Russ.)

19. Konnikov EG, Tsygankov AA, Orsoev DA. Chaysky copper-nickel deposit. In: *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya* = Deposits of Transbaikalia. Vol. 1. Book 1. Moscow: Geoinformark; 1995. p.39–47. (In Russ.)

20. Sharakhshinov AO. Mukhalsky deposit as a new genetic type of nepheline rocks. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 1984;1:89–92. (In Russ.)

21. Nefed'ev MA. Synnyrites as new complex raw materials for the production of aluminum and potash fertilizers (Northern Baikal region). In: *Mineragiya severo-vostochnoi Azii: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = Minerageny of Northeast Asia: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference. Ulan-Ude: Ekos; 2011. p.111–113. (In Russ.)

22. Ripp GS, Kobylkina OV, Doroshkevich AG, Sharakhshinov AO. *Late Mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre of Siberian Department of Russian Academy of Sciences; 2000. 224 p. (In Russ.)

23. Ripp GS, Izbrodin IA, Lastochkin EI, Rampilov MO, Doroshkevich AG, Khromova EA. A new type of rare metal mineralization in the Western Transbaikalia. *Otechestvennaya geologiya*. 2018;3:9–21. (In Russ.)

24. Lykhin DA, Yarmolyuk VV. *West Transbaikalia beryllium province: deposits, ore-bearing magmatism, substance sources*. Moscow: GEOS; 2015. 256 p. (In Russ.)

25. Samovich DA. Vitim industrial uranium ore district. *Razvedka i okhrana nedr* = Prospect and protection of mineral resources. 2007;12:21–32. (In Russ.)



26. Bulnaev KB. *Fluorite deposits of Western Transbaikalia: metallogenic analysis*. Novosibirsk: Nauka; 1976. 128 p. (In Russ.)

27. Andreev GV, Gordienko IV, Kuznetsov AN, Kravchenko AI. *Apatite-bearing diorites of*

Southwest Transbaikalia. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1972. 200 p. (In Russ.)

28. Mikhailov BK, Ivanov AI, Vartanyan SS, Benevol'skii BI. Problems of Russia's mineral resource base of gold. *Rudy i metally*. 2015;1:93–99. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Гордиенко И.В. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Ivan V. Gordienko is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторе / Information about the author



Гордиенко Иван Власович,
доктор геолого-минералогических наук,
член-корреспондент РАН, советник РАН,
главный научный сотрудник,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: gord@pres.bsnet.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2890-1105>
Ivan V. Gordienko,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Corresponding Member of RAS, Counsellor of RAS,
Chief Researcher,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhyanovoi St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: gord@pres.bsnet.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2890-1105>



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.83

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-36-48>

Поиски гидрогеотермальных резервуаров геофизическими методами в Монголо-Байкальском регионе

© П.С. Бадминов^a, Д. Сурмаажав^b, А.Ю. Ескин^c, М.С. Шкиря^d^{a,c}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^bКорпорация «Монгол Ус», г. Улан-Батор, Монголия^dИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключается в изучении возможности поисков гидрогеотермальных резервуаров в Монголо-Байкальском регионе геофизическими методами. Для достижения поставленной цели использованы следующие методы: метод зондирования становлением поля в ближней зоне, метод вертикального электромагнитного зондирования и метод вызванной поляризации. Эти методы хорошо зарекомендовали себя при выделении объектов с контрастными удельными сопротивлениями на различных глубинах. Причиной низких сопротивлений (5–10 Ом·м) твердых пород могут служить трещиноватые зоны, насыщенные высокотемпературными минерализованными растворами (гидротермальные резервуары). В результате проведенных наземных геофизических исследований на эталонном (месторождение гидротерм Шивэрт Архангайского аймака Монголии) и на прогнозном участке вблизи вулкана Сангийн-Толгой в 7–8 км от аймачного центра г. Цэцэрлэг на различных глубинах выявлены гидрогеотермальные резервуары, изолированные от дневной поверхности. Гидротермы месторождения Шивэрт с температурой 67 °С выведены на поверхность неглубокими скважинами до 78 м. На прогнозном участке, расположенном в пределах внутреннего прогиба Хангайского синклинария, глубина залегания гидрогеотермального резервуара – до 700 м и глубже. Пробуренная на этом участке скважина глубиной 450 м вывела на поверхность напорные субтермальные воды с температурой до 16 °С, несмотря на приток холодных вод в нижнем 100-метровом интервале. Также произведена оценка теплового состояния подземной гидросферы Хангайского сводового поднятия по данным о химическом составе более чем 20 термальных источников с помощью гидрогеохимических геотермометров. Высокие температуры подземной гидросферы Хангайского сводового поднятия, связанные с магматогенной термоаномалией, представляют огромный практический интерес. Термальные воды Монголо-Байкальского региона сосредоточены в термовыводящих зонах разломов и при наличии перекрывающих осадочных отложений не всегда имеют выход на дневную поверхность. Геофизические методы вполне могут быть использованы для поисков таких гидрогеотермальных резервуаров.

Ключевые слова: гидрогеотермальные резервуары, термальные воды, геоэлектрический разрез, зоны минерализованных растворов, гидрогеохимические геотермометры

Информация о статье: Дата поступления 10 января 2020 г.; дата принятия к печати 11 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Бадминов П.С., Сурмаажав Д., Ескин А.Ю., Шкиря М.С. Поиски гидрогеотермальных резервуаров геофизическими методами в Монголо-Байкальском регионе. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 36–48. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-36-48>

Exploration for hydrothermal geological reservoirs by geophysical methods in the Mongol-Baikal region

© Prokopii S. Badminov^a, Damdin Surmaajav^b, Alexander Yu. Eskin^c, Mikhail S. Shkiryayev^d^{a,c}Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia^b"Mongol Us" Corporation, Ulan Bator, Mongolia^dIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The paper presents the study on the prospects of the exploration for hydrothermal geological reservoirs in the Mongol-Baikal region using geophysical methods. For the purpose of the study, the following methods have been used: transient electromagnetic sounding, vertical electromagnetic sounding, and induced polarization method. The above methods have proved effective in the selecting the objects with contrast resistivity at various depths. The low resistance (5–10 Ohm·m) of the hard rock can be caused by the presence of fractured zones with



high-temperature mineralized solutions, i.e. hydrothermal reservoirs. As a result of the surface geophysical studies carried out at different depths at the reference site (Shivert hydrotherm deposit, Arkhangai aimak, Mongolia) and at the prospective site in the vicinity of Sangiyin-Tolgoi volcano (7–8 km from the regional center Tsetserlag), hydrothermal geological reservoirs isolated from the day surface have been identified. The Shivert hydrothermal deposits with a temperature of 67 °C have been brought to the surface with shallow boreholes up to 78 m deep. At the prospective site located within the internal deflection of the Khangai synclinorium, the hydrothermal geological reservoir is at a depth of over 700 m. A 400 m deep borehole drilled in this section brought the pressure water with a temperature of up to 16 °C to the surface in spite of the cold water influx in the lower 100-meter interval. The thermal state of the underground hydrosphere of the Khangai arch uplift has been estimated using hydrogeochemical geothermometers, based on the chemical composition of more than 20 thermal sources. The underground hydrosphere of the Khangai arch uplift with its high temperatures associated with magmatogene thermal anomaly is of great practical interest. The thermal waters of the Mongol-Baikal region are concentrated in the thermal effluent fault zones and in the presence of overlapping sedimentary deposits, do not always make their way to the day surface. The above geophysical methods are suitable for the exploration for such hydrothermal reservoirs.

Keywords: hydrothermal geological resources, thermal waters, geoelectric section, mineralized-solution zones, hydrogeochemical geothermometers

Information about the article: Received January 10, 2020; accepted for publication February 11, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Badminov PS, Surmaajav D, Eskin AYU, Shkiryа MS. Exploration for hydrothermal geological reservoirs by geophysical methods in the Mongol-Baikal region. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):36–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-36-48>

Введение

Гидрогеотермальная энергия (тепло земных недр) является экологически чистым возобновляемым ресурсом. Одно из его огромных преимуществ – это доступность. Постоянный поток тепла Земли обеспечивает неисчерпаемый источник энергии [1]. Монголо-Байкальский регион, особенно восточный сегмент Хангайского сводового поднятия, чрезвычайно богат термальными водами и представлен многочисленными источниками с температурами на выходе от 30 до 92 °C [2]. В мировой практике такие источники гидрогеотермальной энергии считаются низкопотенциальными и используются в целях тепло- и водоснабжения. Однако в последнее время появились установки с бинарными схемами (в качестве теплоносителя используются низкокипящие жидкости), позволяющие вырабатывать электроэнергию при температурах источников 80–90 °C, а бурение глубоких скважин позволяет поднять температуру природного теплоносителя свыше 100 °C.

Одной из слабых сторон использования гидрогеотермальной энергии считается отдаленность источников от конечного потребителя при том, что транспортировка теплоносителя экономически

нецелесообразна. Поэтому поиски гидрогеотермальных резервуаров на доступных для бурения глубинах, способных вывести на поверхность высокотемпературные термальные воды, становятся актуальными, особенно в районах, испытывающих острый дефицит электроэнергии.

Специальные исследования для поисков гидрогеотермальных резервуаров в Монголо-Байкальском регионе до сих пор не проводились. Это было связано в первую очередь с вектором экономического развития, направленным на использование традиционных источников энергии. Тем не менее на побережье оз. Байкал на небольших глубинах от 120 до 278 м буровыми скважинами были вскрыты термальные воды, не имевшие до этого выходов на дневную поверхность, однако условия их формирования и распространения были неизвестны. В последние годы нарастающий дефицит органических видов топлива и жесткие экологические требования заставляют обращать все большее внимание на альтернативные источники энергии, наиболее перспективным из которых является гидрогеотермальная энергия, так как она считается одним из самых надежных видов возобновляемой энергии.



Материалы и методы исследования

Рассмотрим краткую геологическую характеристику района исследования и предпосылки существования скрытых гидрогеотермальных резервуаров. Район исследований охватывает центральную часть Монголии в пределах Хангайского сводового поднятия и территориально расположен в пределах Архангайского аймака (рис. 1). Предпосылками существования скрытых гидрогеотермальных резервуаров в районе аймачного центра г. Цэцэрлэг является его близость к месторождениям гидротерм Шивэрт, Цэнхэр (20–30 км) и месторождению субтерм Хуйтен, окружающих со всех сторон долину р. Урд-Тамир с предположительно единым источником тепла и механизмом теплопередачи. Локальные тепловые аномалии, часто совпадающие с зонами разгрузки гидротерм, обусловлены в основном тектонической активизацией и конвективным выносом тепла из наиболее проницаемых и подвижных участков в верхних горизонтах земной коры. Такие участки наиболее перспективны для получения и использования гидрогеотермальной энергии [3]. Гидротермальная активность и высокий тепловой потенциал земных недр Центральной Монголии связаны с вулканической деятельностью и ее пространственно-временной эволюцией, явившейся следствием коллизии со стороны Индийского индентера и образования ослабленных мантийных зон. В долине р. Урд-Тамир в непосредственной близости от города существуют вулканические постройки миоценового возраста, а в смежном бассейне р. Орхон получил пространственное обособление Верхне-Орхонский ареал четвертичной вулканической деятельности. Мантия под этим ареалом должна быть наиболее высокотемпературной и остается потенциально способной к магмогенерации [4, 5]. Очаги магмогенерации также дали начало многофазным плутонам, которые в процессе

внедрения и кристаллизации сформировали сложную многофазную структуру Хангайского гранитоидного батолита [6, 7]. Кроме того, плотность кондуктивного теплового потока q , оцененная по изотопному составу гелия, в термальных источниках Хангая превышает нормальный фоновый уровень для палеозойской коры и свидетельствует о более позднем, дополнительном поступлении в нее гелия из мантии [8].

Основу геологического разреза исследуемой территории составляют осадочно-метаморфические породы среднего палеозоя, прорванные герцинскими интрузиями, наиболее широко распространенными в Монголии, а также кайнозойские эффузивы [9]. Среднепалеозойские отложения представлены главным образом песчаниками, кремнистыми, глинистыми и реже кристаллическими сланцами, конгломератами, известняками, кварцитами, филлитами, спилитами. В отложениях континентальных фаций к этим породам добавляются еще углистоглинистые сланцы. Герцинские интрузии представлены порфировидными биотитовыми и биотит-роговообманковыми гранитами, составляющими обычно срединные их части; в краевых частях интрузий наблюдаются гранодиориты, кварцевые сиениты, граносиениты, диориты, являющиеся продуктами дифференциации крупных гранитных интрузий. Кайнозойские эффузивные образования представлены преимущественно базальтами крупного Тамирского сегмента позднекайнозойских вулканических извержений. Цэцэрлэгское вулканическое поле занимает площадь около 4500 км². Вулканические останцы располагаются преимущественно на вершинах горных отрогов, но в тектонически опущенных блоках обнажены на уровне тальвегов речных долин. Юго-восточнее г. Цэцэрлэг базальты находятся в долине р. Урд-Тамир. Сама межгорная Урд-Тамирская впадина сложена песками, песчаниками, конгломератами, гравелитами, глинами третичного возраста.

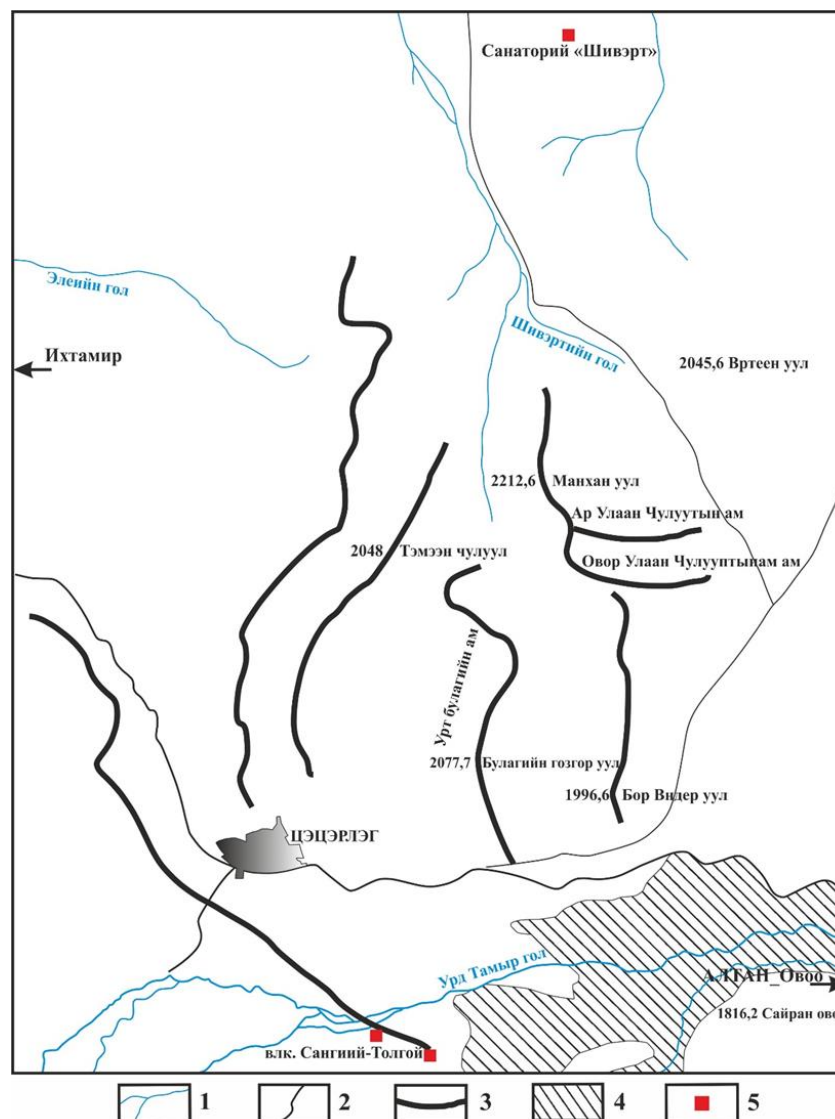


Рис. 1. Схема района геофизических исследований:

1 – реки; 2 – дороги; 3 – горные хребты; 4 – заболоченные участки; 5 – геофизические полигоны

Fig. 1. Scheme of the geophysical research area:

1 – rivers; 2 – roads; 3 – mountain ranges; 4 – wetlands; 5 – geophysical ranges

На данный момент, на наш взгляд, существует два метода, позволяющих вести поиски гидрогеотермальных резервуаров в Монголо-Байкальском регионе. Первый – пассивная сейсмотомография, второй – электроразведка. Первый метод, изначально появившийся в сейсмологии и инженерных изысканиях (микросейсмика), ныне является крайне перспективным для прослеживания путей миграции жидкостей (воды, нефти) и газов (углеводорода, пара), контроля за изменением проницаемости ослабленных зон. Метод основан на изучении микроземлетрясений, происходящих как при

формировании трещин и микроразломов под влиянием гидравлического давления, так и при шумах, связанных непосредственно с движением флюидов по трещинам. Метод требует организации сети наблюдений и регистрации естественных шумов горного массива, а также достаточно сложной математической обработки и интерпретации полученных сигналов [10]. Методы электроразведки, в частности метод зондирования становлением поля в ближней зоне и метод вызванной поляризации, использовались ранее для обнаружения залежей углеводородов, рудных тел и



являются эффективными при выделении объектов с контрастными удельными сопротивлениями. Известно, что удельное сопротивление в сильной степени зависит от температуры породы и минерализации насыщающих его растворов [11]. Геофизические исследования, проведенные на месторождениях гидротерм Шивэрт (Монголия), Сухая (Россия), показывают, что причиной низких сопротивлений (5–10 Ом·м) твердых пород служат трещиноватые зоны, насыщенные высокотемпературными минерализованными растворами (гидротермальные резервуары), которые на поверхности земли маркируются термальными скважинами и источниками [12]. В данном регионе гидротермы имеют повышенную минерализацию по сравнению с подземными водами в скважинах, родниках, колодцах [13]. Континентальные пресноводные отложения не имеют в своем разрезе галогенных формаций, характерных для осадочных пород морских бассейнов, и седиментационные воды даже в застойных условиях могут оставаться пресными. Если осадочные отложения невелики или отсутствуют вовсе (Шивэрт, Цэнхэр, Хуйтен в Моголии), то термальные воды выходят на поверхность, а если они достаточно мощные (200–300 м), то надежно изолируют гидротермальные резервуары, которые могут быть вскрыты буровыми скважинами (Сухая, Большая Речка, Энхалук в России).

Для получения сведений о тепловом состоянии подземной гидросферы Хангайского сводового поднятия проведено газово-геохимическое и температурное опробование более 20 минеральных источников. Температурные замеры не всегда позволяют определить причины наблюдаемых термоаномалий – определить влияние экзогенных и эндогенных факторов [14]. Оценить роль последних можно, привлекая данные о температурных условиях формирования химического состава вод в пласте. Температуры формирования воды в пласте можно оценить косвенными методами,

используя гидрогеохимические геотермометры [15–17]. Для расчетов нами использован кремниевый геотермометр, показавший удовлетворительные результаты при определении «базовых температур» азотных терм Байкальской рифтовой зоны [18].

Результаты исследования и их обсуждение

Соотношения содержания двуокиси кремния в воде термальных минеральных источников Хангая с температурой источников ложатся на кривую растворимости α -кристобалита. Соответственно, оценки расчетных температур произведены по формуле Фурнье – Трусделла для низкотемпературных систем ($T_{\text{пов.}} < T_{\text{крит.}}$) (таблица):

$$T_{\text{эл.}} = \frac{1051,1}{4,655 - \lg \text{SiO}_2} - 273,15,$$

где $T_{\text{эл.}}$ – температура источника на глубине его формирования; SiO_2 – содержание двуокиси кремния.

Значения глубинных температур и средний геотермический градиент $\gamma = 25^\circ\text{C}/\text{км}$, принятый для данного региона [19], позволяют оценить глубину формирования гидротерм. Они находятся в пределах 1,53–5,37 км. Термальные воды, сосредоточенные в зонах термовыводящих разломов, при наличии перекрывающих осадочных отложений могут не иметь выхода на поверхность и формировать на небольших глубинах вторичные гидротермальные резервуары со своими подводными каналами.

Для поисков таких гидрогеотермальных резервуаров были проведены наземные геофизические исследования на территории Архангайского аймака Монгольской Народной Республики методом зондирования становлением поля в ближней зоне в варианте метода переходных процессов, методом вызванной поляризации, также использована технология вертикальных электромагнитных зондирований. Совместное применение этих методов обеспечивает максимальную информативность и надежность полученных результатов. Геофизические работы проведены на эталонном



**Прогнозные температуры глубинных вод по кремниевому геотермометру
в низкотемпературных ($T_{\text{пов.}} < T_{\text{кип.}}$) системах Хангая
Deep water temperature estimated by a silicon geo-thermometer
in the low-temperature Khangai systems ($T_{\text{пов.}} < T_{\text{кип.}}$)**

Источник	$T_{\text{пов.}}, ^\circ\text{C}$	$\text{H}_4\text{SiO}_4, \text{мг/л}$	$\text{SiO}_2, \text{мг/л}$	$T_{\text{эл.}}, ^\circ\text{C}$ прогноз.	$H_{\text{форм.}}, \text{км} = T_{\text{эл.}} / \gamma$
Шивэрт	57	145,5	97	120,8	4,83
Хуйтэн-Аршан	12,5	131,07	87,38	114,1	4,56
Цэнхэр	84	178,57	119,05	134,4	5,37
Бор тал	52	98,05	65,37	97	3,88
Гялгар	52	121,95	81,3	109,8	4,39
Цаган-Сум	69,1	133	88,7	115,1	4,61
Ганц мод	4	28,57	19,05	38,3	1,53
Цац	5	8	5,33	–	–
Могод	57	104	69,36	100,4	4,01
Хануй	3	54	36,01	66	2,64
Хан-Ундэр	2,6	44	29,34	56,6	2,26
Мухар-Хужирт	3,2	33	22,01	44,2	1,77
Бэлхийн	5,4	35	23,34	46,6	1,86
Ангархай	0,8	34	22,67	45,4	1,81
Чулуут	45,2	100	66,69	98,1	3,93
Улан-Урэг	13,5	57	38,01	68,7	2,75
Ноён-хангай	36,4	130	86,7	113,7	4,55
Шаргалжут	88	154	102,7	124,5	4,98
Хужирт	47	144	96,04	120,1	4,8
Хурэмт	55,5	133	88,7	115,1	4,61
Уртын тохой	10,5	74,1	49,42	81,8	3,27

Примечание: $T_{\text{пов.}}$ – температура источника на поверхности земли; $T_{\text{кип.}}$ – температура кипения воды; $T_{\text{эл.}}$ – температура источника на глубине его формирования; $H_{\text{форм.}}$ – глубина формирования источника; γ – средний геотермический градиент.

Note: $T_{\text{пов.}}$ – surface temperature of the source; $T_{\text{кип.}}$ – boiling point of water; $T_{\text{эл.}}$ – source temperature at the depth of its formation; $H_{\text{форм.}}$ – source formation depth; γ – average geothermal gradient.

(месторождение гидротерм Шивэрт) и на прогнозном участке вблизи вулкана Сангийн-Толгой. Сеть профилей и точек наблюдений разбивалась с помощью GPS-навигаторов таким образом, чтобы подсечь возможный переток термальных вод по долине р. Шивэртийн-Гол в Урд-Тамирскую впадину, а также обнаружить их возможную дислокацию в районе вулкана Сангийн-Толгой (см. рис. 1).

На эталонном участке низкоомные объекты со значениями удельных электрических сопротивлений 1–10 Ом·м маркируются на поверхности термальными источниками и неглубокими скважинами до 78 м, что послужило основой для предположения о существовании термальных вод на прогнозном участке, где также на различных глубинах выделены объекты с низкими значениями удельных

электрических сопротивлений. На эталонном участке геофизические профили проложены вдоль (зондирование становлением поля в ближней зоне) и вкрест (вертикальное электромагнитное зондирование) простираения долины р. Шивэртийн-Гол (рис. 2, 3). В геоэлектрическом разрезе месторождение гидротерм Шивэрт выделяется в виде неглубоко залегающего резервуара с низкими значениями удельных электрических сопротивлений 0–30 Ом·м. В 500 м выше по склону долины на восток, в точке V3 обнаружен еще один объект с пониженными значениями удельных электрических сопротивлений до 80–100 Ом·м. В плане он совпадает с местоположением скважины холодного питьевого водоснабжения курорта «Шивэрт».

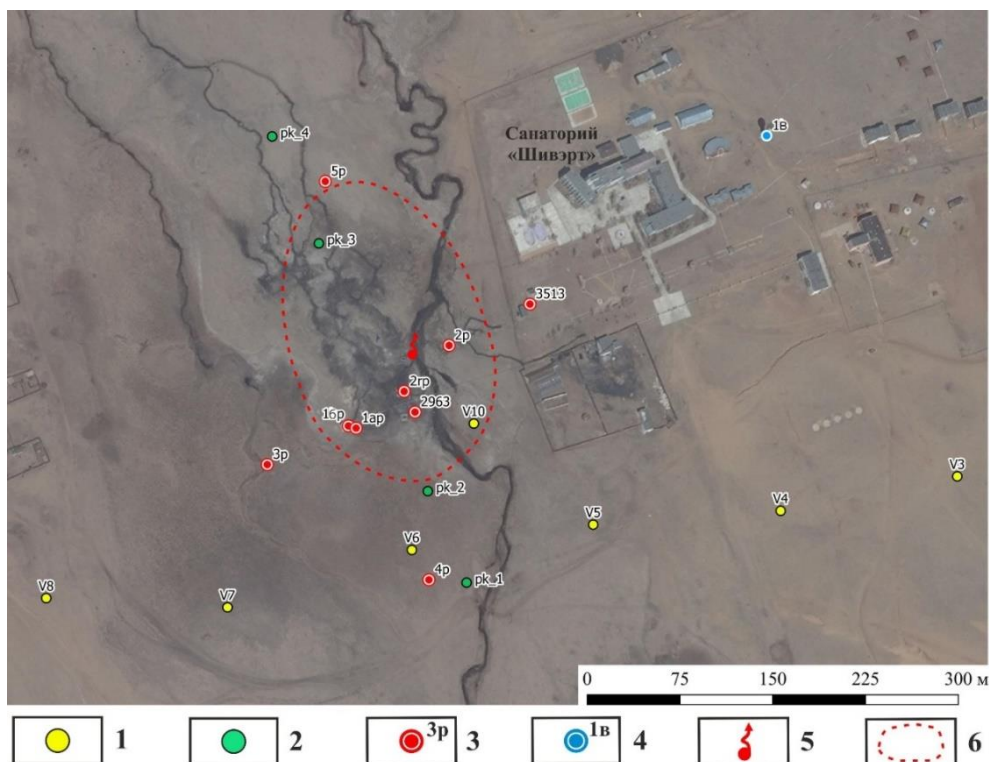


Рис. 2. Схема геофизических профилей в районе долины р. Шивэртийн-Гол:
1 – точки вертикального электромагнитного зондирования; 2 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне; 3 – скважины, вскрывшие термальные и субтермальные воды; 4 – водозаборная скважина; 5 – термальный источник; 6 – проекция гидрогеотермального резервуара

Fig. 2. Scheme of geophysical profiles in the Shivertijn-Gol river valley:
1 – vertical electromagnetic sounding points; 2 – transient electromagnetic sounding points;
3 – thermal and sub-thermal water wells; 4 – water intake well;
5 – thermal source; 6 – hydrothermal geological reservoir projection

В результате проведения поисково-разведочных работ Аршанской партией Улан-Баторского геологического управления было пробурено четыре скважины и еще одна – по результатам работ гидрогеологического отряда Института земной коры СО РАН. Составлены схематические гидрогеологический и геотермический разрезы вкрест простирания долины р. Шивэрт (рис. 4). Разгрузка термальных вод происходит по зоне разлома через песчано-гравийные отложения, а сам гидрогеотермальный резервуар сосредоточен в зоне дробления коренных пород на глубине от 40 до 150 м и имеет свой подводящий канал. Проекция этого гидрогеотермального резервуара на земную поверхность имеет овальную форму, что хорошо прослеживается по гидрогеологическому, геоэлектрическому разрезам и геоморфологическим признакам (см. рис. 2–4). Деградация многолетней

мерзлоты обнажила выходы обломков коренных пород в пойме р. Шивэртийн-Гол.

Прогнозный участок расположен в долине р. Урд-Тамир в 7–8 км от аймачного центра г. Цэцэрлэг у подножья вулкана Сангийн-Толгой. На самом вулкане обнаружен горизонт гиалокластитов и подушечных лав, перекрытый базальтовыми потоками. Поток из нижней части лавового пакета показал среднемиоценовый K-Ar возраст $15,6 \pm 0,7$ млн лет [20]. Гиалокластиты и подушечные лавы имеют мощность до 30 м. Эти породы явились результатом взаимодействия магматических расплавов с водой среднемиоценового палеоозера Тамирской впадины. Под слоем гиалокластитов и подушечных лав можно ожидать распространение обломочных отложений, накопившихся в палеоозере при нисходящем движении тектонических блоков фундамента впадины. На прогнозном участке

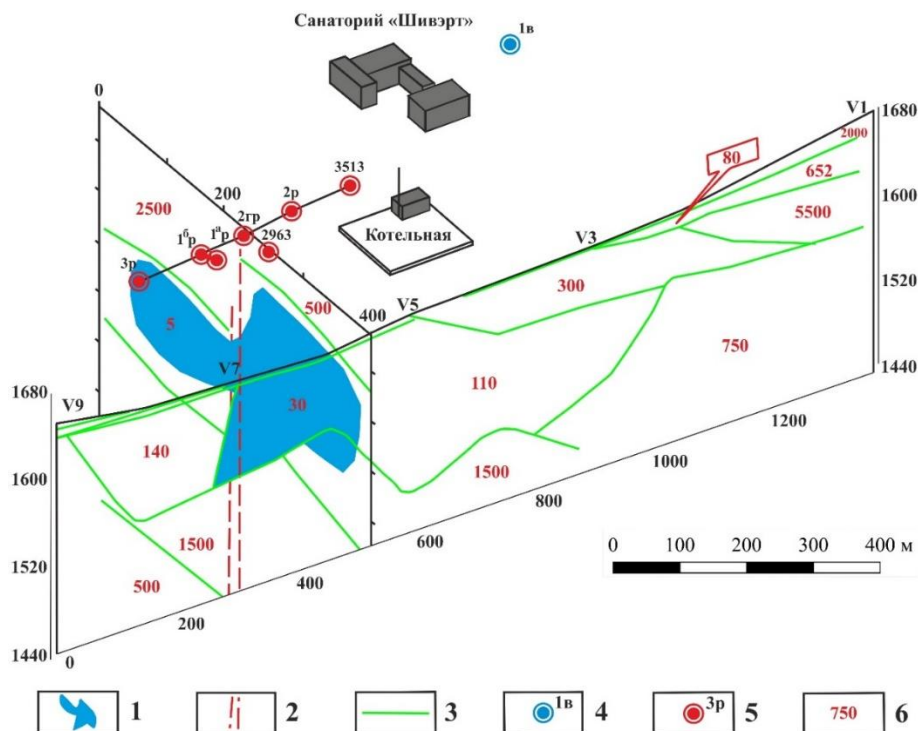


Рис. 3. Схема геоэлектрических разрезов в псевдотрехмерной проекции с указанием контура территории санатория «Шивэрт»:

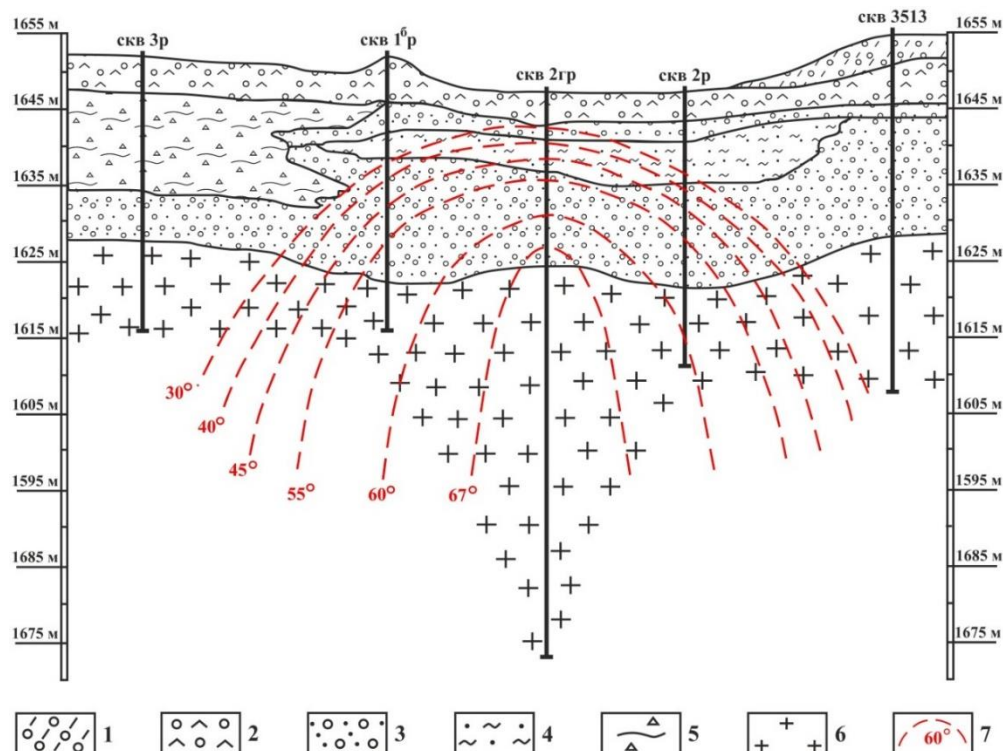
- 1 – гидрогеотермальный резервуар; 2 – зона разлома; 3 – границы геоэлектрических слоев;
4 – водозаборная скважина; 5 – скважины, вскрывшие термальные и субтермальные воды;
6 – значения удельных электрических сопротивлений

Fig. 3. Scheme of geoelectric sections in pseudo three-dimensional projection indicating the contour of the Shivert Sanatorium territory:

- 1 – hydrothermal geological reservoir; 2 – fault zone; 3 – boundaries of the geoelectric layers;
4 – water intake well; 5 – thermal and sub-thermal water wells;
6 – electrical resistivity values

геофизические исследования проводились методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. На геоэлектрическом разрезе по аналогии с разрезом на эталонном участке Шивэрт выделяются как субгоризонтальные, так и субвертикальные зоны с аномально низкими значениями удельных электрических сопротивлений 1–10 Ом·м (рис. 5). Субгоризонтальные структурные элементы представляют собой, по нашему мнению, высокотемпературные минерализованные гидротермальные резервуары, а субвертикальные объекты являются подводящими каналами, по которым осуществляется подъем нагретых вод с больших глубин. Стоит отметить, что размеры этих резервуаров небольшие – 100–200 м, залегают они на глубинах от 400 до 2000 м. Сверху гидротермальные резервуары перекрыты непро-

ницаемыми породами и многолетней мерзлотой. Вертикальное электромагнитное зондирование на прогнозном участке было проведено до глубин 80–100 м и показало отсутствие вторичных гидротермальных резервуаров на этих глубинах. Бурение заверочной скважины глубиной 123 м подтвердило наличие двух обводненных зон с низкими температурами, выделенных на геоэлектрическом разрезе. В 2016 г. было начато бурение скважины проектной глубиной 700 м, однако на глубине 450 м оно было остановлено. Скважина вскрыла напорные субтермальные воды с температурой 16 °С на забое. При определении геотермических градиентов для четырех интервалов (через 100 м) выполнена непрерывная запись температур по стволу скважины. Выяснилась достаточно сложная картина сочетания обводненных зон



**Рис. 4. Гидрогеологический и геотермический разрезы
вкрест простирания долины р. Шивэртийн-Гол:**

1 – супесь и суглинок темновато-бурого цвета с редкими валунами; 2 – валунно-обломочный материал с заполнителем из тонкозернистых песков; 3 – пески с гравием; 4 – разнозернистые пески с прослоями глины зеленовато-темных цветов; 5 – глины желтовато-бурого цвета с редким гравием и дресвой; 6 – граниты окварцованные, измененные, розового цвета; 7 – гидроизотермы

**Fig. 4. Hydrogeological and geothermal sections
across the strike of the Shivertin-Gol river valley:**

1 – sandy loam and loam of dark brown color with rare boulders; 2 – boulder-clastic material with fine-grain sand aggregate; 3 – gravelly sands; 4 – variegated sands with clay interbeds of a dark greenish color; 5 – yellow-brown clays with rare gravel and gruss; 6 – silicified granites, altered, pink; 7 – hydro isotherms

с различными температурными градиентами. Градиент температуры $gradt$ на первых 300 м составил $+3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем он возрастал с каждым последующим интервалом, однако вследствие притока холодных вод на глубине 345–360 м понизился до $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тенденция на увеличение $gradt$ с глубиной дает надежду на вскрытие термальных вод с температурой до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на доступных глубинах. Величина теплового потока с учетом среднего $gradt$ $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, полученного при бурении 450-метровой скважины, и среднего значения теплопроводности метаморфических пород $2,65\text{ Вт/(м}\cdot\text{град.)}$, принятого для Хангайского сводового поднятия [21, 22], составит $79,5\text{ мВт/м}^2$, что превышает величины теплового потока, полученные расчетным путем, по содержанию

изотопов гелия в термальных водах Хангая.

Заключение

Высокие температуры подземной гидросферы Восточного Хангая связаны с магматогенной термоаномалией и представляют огромный практический интерес. Этот регион может быть рекомендован не только для использования гидрогеотермальной энергии в коммунальном хозяйстве, но и для выработки электроэнергии (минимальная необходимая температура – $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ при дебите 5–6 л/с). Расчетные глубины формирования гидротерм находятся в пределах 4 км, однако их реальные значения, учитывая потери тепла при подъеме и смешении с метеорными водами, будут значительно больше.

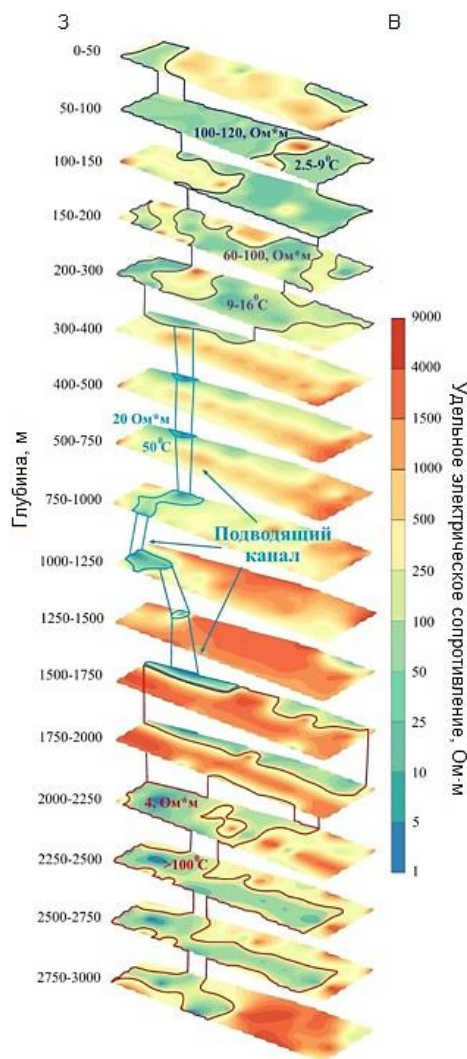


Рис. 5. Горизонтальные срезы удельных электрических сопротивлений по данным метода вызванной поляризации
Fig. 5. Horizontal sections of electrical resistivity according to the induced polarization method data

По результатам бурения выявлена сложная картина чередования обводненных зон с холодными и субтермальными водами в трещинном резервуаре кристаллического массива. Для выведения субтермальных и термальных вод с более высокими температурами необходимо надежно изолировать интервалы (места) притоков холодных вод в ствол скважины.

Геофизические методы, в частности метод зондирования становлением

поля в ближней зоне, метод вызванной поляризации и технология вертикальных электромагнитных зондирований, вполне могут быть использованы для поисков скрытых гидрогеотермальных ресурсов в Монголо-Байкальском регионе, где сама природа создала все необходимые предпосылки для существования многочисленных месторождений термальных вод на небольших доступных для бурения глубинах.

Библиографический список

1. Blodgett L., Slack K. Geothermal 101: basics of geothermal energy production and use. Washington: Geothermal Energy Association, 2009. 55 p.

2. Намнандорж О., Цырен Ш., Нямдорж Ө. БНМАУ-ын рашаан. Улаанбаатар: Изд-во УХГ, 1966. 468 с.



3. Лысак С.В. Геотермия южных районов Восточной Сибири // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1996. С. 17–23.

4. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Мордвинова В.В., Брандт И.С., Брандт С.В., Ершов К.В. Развитие кайнозойского магматизма Центральной Азии как выражение процессов образования Саяно-Монгольского низкоскоростного мантийного домена // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: материалы науч. совещ. по интеграционным программам Отделения наук о Земле СО РАН. Вып. 4. Т. 2. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. С. 95–98.

5. Саватенков В.М., Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М. Источники и геодинамика позднекайнозойского вулканизма Центральной Монголии по данным изотопно-геохимических исследований // Петрология. 2010. Т. 18. № 3. С. 297–327.

6. Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кузьмин М.И. Зональные магматические ареалы и анорогенное баталитообразование в Центрально-Азиатском складчатом поясе: на примере позднепалеозойской Хангайской магматической области // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 457–475.

7. Турутанов Е.Х. Крупнейшие гранитоидные плутоны Земли: форма и размеры. Бо-Бас-сен: Lambert Academic Publishig, 2019. 80 с.

8. Поляк Б.Г., Хуторский М.Д., Каменский И.Л., Прасолов Э.М. Тепломассопоток из мантии на территории Монголии // Геохимия. 1994. № 12. С. 1693–1705.

9. Филиппова И.Б. Основные черты строения и развития Хангайского синклиниория // Геотектоника. 1969. № 5. С. 77–95.

10. Колонин А.Г. Возможности использования результатов сейсмического просвечивания для обнаружения локальных неоднородностей // Геология и геофизика. 1989. № 3. С. 101–110.

11. Иселидзе О.В., Жуков В.С., Цыбульский С.П., Баянова Н.Г. Влияние температуры на удельное электрическое сопротивление водонасыщенных образцов песчаника // Вести газовой науки. 2014. № 4 (20). С. 184–187.

12. Бадминов П.С., Мироманов А.В.,

Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Тарасов И.А., Степаненко А.В. Перспективы поисков термальных вод в Усть-Селенгинском артезианском бассейне // XX Всероссийское совещание по подземным водам востока России. Иркутск: ООО «Географ», 2012. С. 285–288.

13. Oyuntsetseg D. Geochemical characterization of the thermal fluid from Khangay area, Central Mongolia // Geothermal Training in Iceland. Reykjavik: UNU-GTP, 2009. P. 125–150.

14. Лаврушин В.Ю., Маковозов А.О. Температура минеральных вод – отражение магматогенной термоаномалии в районе вулкана Казбек // Вестник Владикавказского научного центра. 2004. Т. 4. № 3. С. 33–40.

15. Kharaka Y.K., Mariner R.H. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins // Thermal history of sedimentary basins. Methods and case histories. New York: Springer-Verlag, 1989. P. 99–117.

16. Philip H., Cisternas A., Gvishniani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // Tectonophysics. 1989. Vol. 161. P. 1–21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7)

17. Fournier R.O., Truesdell A.H. An empirical Na-K-Ca chemical geothermometer for natural waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1973. Vol. 37. Iss. 5. P. 1255–1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)

18. Голубев В.А. Тепловые и химические характеристики гидротермальных систем Байкальской рифтовой зоны // Советская геология. 1982. № 10. С. 100–108.

19. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.

20. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Гео, 2012. 351 с.

21. Лысак С.В., Дорофеева Р.П. Термальное состояние литосферы в Монголии // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 9. С. 929–941.

22. Дорофеева Р.П. Тепловой поток территории Монголии // Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона: сб. стат. Новосибирск: Наука, 1995. С. 123–145.

References

1. Blodgett L, Slack K. *Geothermal 101: basics of geothermal energy production and use*. Washington: Geothermal Energy Association; 2009. 55 p.

2. Намнандорж О, Цырен Ш, Нямдорж Ө. *Arshans of the Mongol People's Republic*. Ulaanbaatar: State Press Service Committee; 1966. 468 p. (In Mongol.)

3. Lysak SV. Geothermy of the southern regions of Eastern Siberia. In: *Geofizicheskie*

issledovaniya v Vostochnoi Sibiri na rubezhe XXI veka = Geophysical exploration in Eastern Siberia at the turn of the 21st century. Novosibirsk: Nauka; 1996. p.17–23. (In Russ.)

4. Rasskazov SV, Chuvashova IS, Mordvinova VV, Brandt IS, Brandt SV, Ershov KV. Evolution of Cenozoic magmatism in Central Asia as an expression of the processes of the Sayan-Mongolian low-speed mantle domain formation.



In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa: materialy nauchnogo soveshchaniya po integratsionnym programmam Otdeleniya nauk o Zemle SO RAN* = Geodynamic evolution of the Central Asian active belt lithosphere: Proceedings of the Scientific Meeting on the Integration Programs, Department of Earth Sciences, SB RAS. Iss. 4. Vol. 2. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, SB RAS; 2006. p.95–98. (In Russ.)

5. Savatenkov VM, Yarmolyuk VV, Kudryashova EA, Kozlovskii AM. Sources and geodynamics of the Late Cenozoic volcanism of Central Mongolia according to isotope geochemical studies. *Petrologiya*. 2010;18(3):297–327. (In Russ.)

6. Yarmolyuk VV, Kozlovskii AM, Kuz'min MI. Zonal magmatic ranges and anarogenic battle formation in the Central Asian folded belt: a case study of the Late Paleozoic Khangai magmatic region. *Geologiya i geofizika*. 2016;57(3):457–475. (In Russ.)

7. Turutanov EKh. *The largest granitoid plutons of the Earth: shape and size*. Beau Bassin: Lambert Academic Publishig; 2019. 80 p. (In Russ.)

8. Polyak BG, Khutorskii MD, Kamenskii IL, Prasolov EM. Mantle heat-and-mass flow in the territory of Mongolia. *Geokhimiya*. 1994;12:1693–1705. (In Russ.)

9. Filippova IB. The main features of the structure and development of the Khangai synclinorium. *Geotektonika*. 1969;5:77–95. (In Russ.)

10. Kolonin AG. Prospects of using the results of seismic transmission to detect local inhomogeneities. *Geologiya i geofizika*. 1989;3:101–110. (In Russ.)

11. Iselidze OV, Zhukov VS, Tsybul'skii SP, Bayanova NG. Influence of temperature on specific electroresistance of the water-saturated sandstone. *Vesti gazovoi nauki*. 2014;4:184–187. (In Russ.)

12. Badminov PS, Miromanov AV, Orgil'yanov AI, Kryukova IG, Tarasov IA, Stepanenko AV. Prospects of the exploration for thermal waters in the Ust-Selenginsky artesian basin. *XX Vserossiiskoe soveshchanie po podzemnym vodam vostoka Rossii* = 20th All-Russian Meeting on the Groundwaters of

the Russian East. Irkutsk: LLC "Geograf"; 2012. p.285–288. (In Russ.)

13. Oyuntsetseg D. Geochemical characterization of the thermal fluid from Khangay area, Central Mongolia. *Geothermal Training in Iceland*. Reykjavik: UNU-GTP; 2009. p.125–150.

14. Lavrushin VYu, Makovozov AO. Mineral water temperature as a reflection of magmatogene thermal anomaly in the Kazbek volcano area. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. 2004;4(3):33–40. (In Russ.)

15. Kharaka YK, Mariner RH. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: *Thermal history of sedimentary basins. Methods and case histories*. New York: Springer-Verlag; 1989. p.99–117.

16. Philip H, Cisternas A, Gvishniani A, Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*. 1989;161:1–21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7)

17. Fournier RO, Truesdell AH. An empirical Na-K-Ca chemical geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973;37(5):1255–1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)

18. Golubev VA. Thermal and chemical characteristics of the hydrothermal systems in the Baikal rift zone. *Sovetskaya geologiya*. 1982;10:100–108. (In Russ.)

19. Golubev VA. *Conductive and convective heat transfer in the Baikal rift zone*. Novosibirsk: Geo; 2007. 222 p. (In Russ.)

20. Rasskazov SV, Chuvashova IS, Yasnygina TA, Fefelov NN, Saranina EV. *Potassium and kalinar volcanic series in the Cenozoic of Asia*. Novosibirsk: Geo; 2012. 351 p. (In Russ.)

21. Lysak SV, Dorofeeva RP. Thermal state of the lithosphere in Mongolia. *Geologiya i geofizika*. 2003;44(9):929–941. (In Russ.)

22. Dorofeeva RP. The heat flow of the territory of Mongolia. In: *Glubinnoe stroenie i geodinamika Mongolo-Sibirskogo regiona* = Deep structure and geodynamics of the Mongol-Siberian region. Novosibirsk: Nauka; 1995. p.123–145. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Бадминов П.С., Сурмаажав Д., Ескин А.Ю., Шкиря М.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Prokopii S. Badminov, Damdin Surmaajav, Alexander Yu. Eskin, Mikhail S. Shkirya are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.



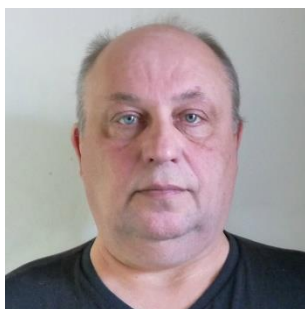
Сведения об авторах / Information about the authors



Бадминов Прокопий Сократович,
ведущий инженер лаборатории гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
✉ e-mail: prokop_sbadminov@mail.ru
Prokopii S. Badminov,
Lead Engineer, Hydrogeology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: prokop_sbadminov@mail.ru



Сурмаажав Дамдин,
старший гидрогеолог,
корпорация «Монгол Ус»,
16050, г. Улан-Батор, р-н Баянгол, ул. Чингунжав, Монголия,
e-mail: surmaajavdamdin@yahoo.com
Damdin Surmaajav,
Senior Hydrogeologist,
"Mongol Us" Corporation,
Chingunzhav St., Bayangol District, Ulan Bator 16050, Mongolia,
e-mail: surmaajavdamdin@yahoo.com



Ескин Александр Юрьевич,
научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: eskin@crust.irk.ru
Alexander Yu. Eskin,
Researcher, Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: eskin@crust.irk.ru



Шкиря Михаил Сергеевич,
инженер,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ms.shkiryayev@gmail.com
Mikhail S. Shkiryayev,
Engineer,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ms.shkiryayev@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.370

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58>

Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м

© Е.В. Агеенков^а, Е.Н. Воднева^б, А.А. Ситников^с

^аВилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

^бЛимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

^сООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключалась в отображении влияния продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств геологических образований в измерениях переходного процесса электрическими линиями на акваториях с глубиной не более 100 м. Было проанализировано изменение сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ – отношения этих величин – в зависимости от продолжительности импульса тока и продолжительности времени измерения переходного процесса для установки, состоящей из источника – горизонтальной заземленной электрической линии (АВ) длиной 500 м – и приемника – трехэлектродной электрической линии (МОН) длиной 500 м. Сигналы, рассчитанные для проводящей среды, сравнивались с сигналами, рассчитанными для проводящей среды с проводящим поляризующимся основанием. Проводящая среда ассоциируется с толщей морской воды в шельфовых областях с глубинами моря до 100 м и неполяризующимися геологическими слоями. Проводящее поляризующееся основание – это геологические образования, которым свойственна вызванная поляризация. Учет поляризуемости основания осуществлен введением частотно зависимого удельного электрического сопротивления формулой Коула – Коула. Сделанные расчеты показывают, что для изучения поляризационного процесса и поляризационных свойств геологической среды, перекрытой водной толщей, оптимальным условием измерений будет использование более продолжительных импульсов и регистрация сигнала до больших времен. Оптимальным условием измерений будет возбуждение переходного процесса импульсами продолжительностью не менее 4 с и регистрация сигнала в течение не менее 4 с. Для практических измерений, проходящих при буксировании установки, продолжительность времени импульсов и времени измерений влияет на количество измеренных переходных процессов в единице длины линии профиля. Соответственно, приходится ограничивать время импульса и измерений, чтобы улучшить возможности статистического выделения полезного сигнала на фоне помех. Но эти ограничения в то же время должны позволить зарегистрировать и проявление процесса гальванически вызванной поляризации в общем сигнале. Сигнал вызванной поляризации начинает преобладать в сигнале переходного процесса на более поздних временах.

Ключевые слова: шельф, становление электромагнитного поля, вызванная поляризация, переходный процесс, формула Коула – Коула, аквальная геоэлектрика

Информация о статье: Дата поступления 23 января 2020 г.; дата принятия к печати 27 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Агеенков Е.В., Воднева Е.Н., Ситников А.А. Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 49–58. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58>



Influence of the pulse duration and transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for marine waters up to 100 m deep

© Evgeny V. Ageenkov^a, Elena N. Vodneva^b, Aleksandr A. Sitnikov^c

^aVilui Geological Survey Expedition, PJSC "ALROSA", Mirmiy, Russia

^bLimnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

^cLLC "Siberian Geophysical Research and Production Company", Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to define the influence of the pulse duration and the transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the electromagnetic properties of the geological formations in the transient measurements by electric lines for marine waters not more than 100 m deep. The study has analyzed the transient signal change $\Delta U(t)$, finite difference $\Delta^2 U(t)$ and transforms $P1(t)$ (the ratio of the above values) as functions of the pulse duration and transient measurement time. The analysis has been conducted with a probe consisting of a source (a horizontal grounded electric line (AB) 500 m long, and a receiver (a three-electrode electric line (MON) 500 m long). The signals calculated for the conducting medium have been compared with the ones calculated for the conducting medium with a conducting polarizable base. The conducting medium is associated with the marine water mass in the shelf areas up to 100 m deep and non-polarizable geological layers. The conducting polarizable base includes geological formations that are characterized with induced polarization. The registration of the base polarization has been realized by introducing frequency-dependent electrical resistivity with the Cole-Cole formula. The calculations show that the optimum condition for the investigation of the polarization process and polarization properties of the geological environment covered with the water mass, is the use of longer-lasting pulses and signal registration till large time values. The optimum measurement condition is inducing the transient process with the pulses with the duration of not less than 4 s, and registering the signal for not less than 4 s. During the practical measurements taking place when towing the probe, the pulse duration and measurement time influence the number of the measured transients in a unit of the profile line length. Correspondingly, the pulse duration and measurement time have to be limited in order to enhance the possibility of the statistical enhancing of the useful signal. At the same time, these limitations should allow registering the display of the galvanic-induced polarization process in the general signal. The induced-polarization signal becomes predominating in the transient at later stages.

Keywords: shelf, transient electromagnetic method, induced polarization, Cole-Cole model, aquatic geoelectric

Information about the article: Received January 23, 2020; accepted for publication February 27, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Ageenkov EV, Vodneva EN, Sitnikov AA. Influence of the pulse duration and transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for marine waters up to 100 m deep. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):49–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58>

Введение

Аквальная геоэлектрика изучает электромагнитные свойства геологических образований, находящихся под толщей воды.

Морская вода сильно минерализована и обладает пониженным удельным электрическим сопротивлением (повышенной проводимостью). Геологические же образования являются проводящей многофазной гетерогенной средой [1]. Проводящим средам свойственно присутствие свободных зарядов, а проводящим многофазным гетерогенным средам – свободных и связанных зарядов.

В проводящих средах электромагнитное поле распространяется диффузионно, в виде растекания (просачивания) вихревого тока. А в проводящих многофазных гетерогенных средах помимо диффузии электромагнитного поля под воздействием внешнего электромагнитного поля (тока) происходит ряд процессов разделения связанных зарядов. После прекращения этого воздействия происходит релаксация такой среды, проявляющаяся в виде совокупности спадов электромагнитного сигнала, протекающих с разной скоростью.



Одним из электроразведочных источников искусственного электромагнитного воздействия на изучаемую среду является заземленная электрическая линия (ЗЭЛ). Существуют аквальные методы электроразведки с гармоническим и импульсным режимами работы такого источника [2, 3]. Для нас исследовательский интерес представляет импульсный режим работы ЗЭЛ с возбуждением в изучаемой среде переходного процесса.

ЗЭЛ состоит из гальванических заземлений (электродов) и подводящих кабелей, соединяющих источник тока и электроды [4]. По направлению течения гальванического тока во время импульса выделяют осевую и экваториальную область ЗЭЛ. В этой публикации сосредоточим свое внимание на измерениях, проводимых в осевой области ЗЭЛ.

Практическое использование ЗЭЛ связано с пропусканием через нее импульсов постоянного тока продолжительностью $t_{имп}$, которые разделены измерением сигнала переходного процесса $t_{изм}$, во время него ток в землю не подается. Для увеличения возможностей фильтрации измеряемых сигналов изменяется полярность импульсов. Таким образом, через источник пропускается серия разнополярных импульсов тока, разделенных измерительной паузой (рис. 1).

Такое воздействие периодически порождает в среде несколько процессов, которые проявляются как электромагнитный сигнал переходного процесса, регистрируемый измерителями над средой, на ее поверхности и внутри нее [5].

Во время включения источника мгновенно во всем пространстве вокруг ЗЭЛ (в воздухе и геологической среде) устанавливается постоянное электрическое поле E_1 .

Установление поля E_1 сопровождается установлением постоянного магнитного поля H_1 , изменяется магнитный поток Φ_1 , охватывающий силовые линии E_1 . При изменении Φ_1 из-за явления самоиндукции возникает электродвижущая сила (ЭДС), препятствующая изменению Φ_1 . В случае нарастания Φ_1 она будет направлена против него. В проводящей среде (земле) ЭДС самоиндукции вызывает вихревое электрическое поле и вихревой ток. Первоначально интенсивное магнитное поле удерживает вихревой ток в соленоидальной ловушке [2] – и вихревой ток высокой плотности сосредоточен в виде кольца, направленного по оси ЗЭЛ внутрь земли. После ослабления магнитного поля вихревой ток начинает диффундировать вглубь земли и вширь – протекает процесс становления электромагнитного поля в земле, связанный с включением источника.

Установившееся (постоянное) электрическое поле в проводящей среде вызывает постоянный ток. В неоднородной среде плотность тока распределяется неравномерно – увеличивается в проводящих областях и уменьшается в высокоомных. На поверхности проводящей среды и внутри нее образуются эквипотенциальные линии, определяющиеся распределением проводимости земли [6]. Измерительные линии регистрируют разность потенциалов между ними.

Протекание тока и вихревой, и гальванической природы в многофазной гетерогенной среде приводит к разделению связанных зарядов. На измерителях разности потенциалов поляризация среды проявляется в виде замедления выхода на постоянное значение. На фоне интенсивной гальванической зарядки среды проявление связанной с вихревым током

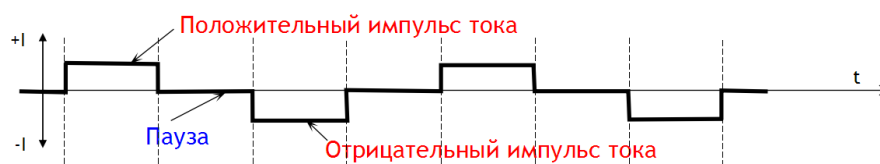


Рис. 1. Форма тока, пропускаемого через заземленную электрическую линию
Fig. 1. Form of the current passing through a grounded electrical line



поляризации – индукционно вызванной поляризации (ВПИ) – для большинства геоэлектрических условий не видно на измерителях.

Продолжительность становления электромагнитного поля определяется проводимостью геологических образований и характеризуется эффективной величиной – параметром становления поля T_{cm}^1 . Поляризация земли связана с совокупностью процессов разделения связанных зарядов, характеризующихся различными временами релаксации (в электроразведке значимое влияние имеют процессы с временем релаксации от микросекунд до секунд) [7]. После возникновения во время включения тока эти явления будут длиться на протяжении времени, определяющимся параметром становления и временем релаксации.

Выключение токового импульса и исчезновение постоянного тока в источнике и среде вызывают ЭДС самоиндукции, вихревое электрическое поле и вихревой ток обратной направленности по сравнению с их направленностью во время включения тока и процессы вызванной поляризации (ВП) (релаксации

многофазной среды) различной природы, проявляющиеся как электромагнитный сигнал. После выключения измерителями регистрируется и сигнал гальванически вызванной поляризации (ВПГ).

Ток ВПИ возникает в геологической среде после затухания вихревого тока и имеет обратное ему направление. На измерителях ток ВПИ проявляется в виде сигнала с противоположным знаком относительно сигнала тока, вызвавшего его.

Многообразие токов, возникающих в среде после пропускания через нее разнополярных импульсов тока, их направление в осевой области источника относительно направления гальванического тока во время пропускания и знак электромагнитного сигнала на измерителе, расположенном в этой области, относительно знака сигнала во время пропускания тока описаны в табл. 1.

Таким образом, при выключении токового импульса измерители регистрируют электромагнитный сигнал, связанный с индукционным (вихревым) током, возникшим во время включения и выключения импульса, и током, возникшим вследствие протекания ВПГ и ВПИ.

Таблица 1

**Токи, возникающие в среде при пропускании через нее
разнополярных импульсов тока**

Table 1

Currents appearing in the medium when passing different-polarity current pulses

Природа тока	Направление тока относительно направления гальванического тока	Знак электромагнитного сигнала относительно знака сигнала во время импульса тока
Вихревой ток после включения импульса	Противоположно	-
Ток индукционно вызванной поляризации после включения импульса	Совпадает	+
Вихревой ток после выключения импульса	Совпадает	+
Ток гальванически вызванной поляризации	Совпадает	+
Ток индукционно вызванной поляризации после выключения импульса	Противоположно	-

¹ Матвеев Б.К. Электроразведка: учебник для студентов. М.: Недра, 1990. 368 с.



Включение и выключение тока в ЗЭЛ, как было показано выше, вызывает в среде несколько процессов, проявляющихся как электромагнитный сигнал переходного процесса. Этот сигнал определяется электромагнитными свойствами водной толщи и геологической среды. Электромагнитным свойствам проводящей многофазной гетерогенной среды характерна зависимость от характеристик воздействующего на нее электромагнитного поля (частоты гармонического поля, продолжительности импульсного воздействия) [8]. В геоэлектрике этот феномен получил название низкочастотной дисперсии (НЧД) электромагнитных свойств или ВП. Для описания зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) геологической среды от характеристик электромагнитного воздействия используется ряд формул, в том числе широко применяется формула Коула – Коула, в которой присутствуют величины ρ_0 (σ_0), η , τ , c . Эти величины дают представление о состоянии геологической среды (о талом или мерзлом), о присутствии различных включений (рудных, льдистых), об изменениях вследствие влияния углеводородов. Поэтому изучение НЧД электромагнитных свойств земли решает некоторые прикладные задачи инженерной и поисковой геофизики, в том числе и на акватории [4].

В сигнале переходного процесса присутствует информация о распределении УЭС с глубиной и о свойствах земли, определяющих НЧД УЭС. Продолжительность измерений переходного процесса определяет полноту информации о переходном процессе и возможности получения информации о распределении электромагнитных свойств среды и характеристиках НЧД. Продолжительность импульса определяет разрыв между фронтом включения тока и фронтом его выключения и разделяет во времени два переходных процесса, начинающихся при включении импульса и при его

выключении. Включение тока сопровождается переходным процессом с сигналом становления электромагнитного поля противоположного знака, который ослабляет сигнал переходного процесса, связанный с выключением тока. Для нас практический интерес вызывает определение оптимальных продолжительности импульса и продолжительности регистрации сигнала переходного процесса для изучения НЧД геологических образований. Это обусловлено тем, что на морских акваториях из-за повышенной проводимости водного слоя становление электромагнитного поля длится дольше, чем в условиях суши [9]. Тем самым электромагнитный сигнал ВП, по которому можно определить характеристики НЧД среды, будет проявляться на более поздних временах, чем при измерениях на суше.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи от одномерной проводящей поляризующейся среды для горизонтальной электрической компоненты неустановившегося электромагнитного поля. Использовался метод линейной фильтрации решения задачи электромагнитного становления [10]. При расчетах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путем преобразования Фурье получалось решение во временной области. ВП среды учитывалась частотно зависимым УЭС по формуле Коула – Коула²:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1+(i\omega\tau)^c} \right),$$

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе, Ом·м; η – коэффициент поляризуемости, доли ед.; τ – постоянная времени, с; c – показатель степени, б.р.; ω – круговая частота, с⁻¹.

Для численного эксперимента была выбрана простая среда – двухслойное полупространство. Водный слой хорошо проводящий, с УЭС 0,25 Ом·м, неполяри-

² Могилатов В.С. Импульсная электроразведка учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. 182 с.



зующийся. Проводящие геологические образования – с УЭС 1,5 Ом·м, что свойственно для морских геологических образований, поляризуемость геологической среды была задана значениями 0 или 15 %. Мощность воды составляла 100 м (табл. 2, 3).

Расчеты сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ ³ [11, 12] проведены для установки: АВ – 500 м, МО – 250 м, ОН – 250 м, расстояние между центрами источника и измерительной линии MN – 1000 м (если использовать другую форму описания установки – А 500 В 500 М 250 О 250 N). Сигнал переходного процесса рассчитывался при различных глубинах расположения электроразведочной установки внутри водного слоя для разных продолжительностей импульса: после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайта или ступень после выключения бесконечно длящегося тока) и для продолжительности 2, 4 и 16 с. Время расчета сигнала начиналось с 1 мс и ограничивалось 16 с

при возбуждении бесконечным импульсом, а при конечном импульсе соответствовало продолжительности импульса и составляло 2, 4 и 16 с (рис. 2).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования представлены в виде графиков $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$ для установки, погруженной на глубину 50 м, для разных форм сигнала.

Главное отличие бесконечно длящегося импульса тока от других видов сигнала источника – отсутствие фронта включения, во время которого в среде, окружающей источник, также начинается переходный процесс. Практические измерения, использующие последовательность разнополярных токовых импульсов, связаны с регистрацией совокупности переходных процессов, начавшихся в разное время: во время выключения тока в источнике, во время включения тока в источнике, а также во время выключения и включения предыдущих импульсов разной полярности. Сигналы переходных процессов от предыдущих импульсов смещены на продолжительность импульса,

Таблица 2

Модель проводящей среды

Table 2

Model of the conducting medium

Слой	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости η , %	Мощность слоя h , м
1	0,25	0	100
2	1,5	0	∞

Таблица 3

Модель проводящей среды с поляризуемым основанием

Table 3

Model of the conducting medium with a polarizable base

Слой	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости η , %	Постоянная времени τ , с	Показатель степени s , б.р.	Мощность слоя h , м
1	0,25	0	–	–	100
2	1,5	15	1	0.5	∞

³ Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 198 с.

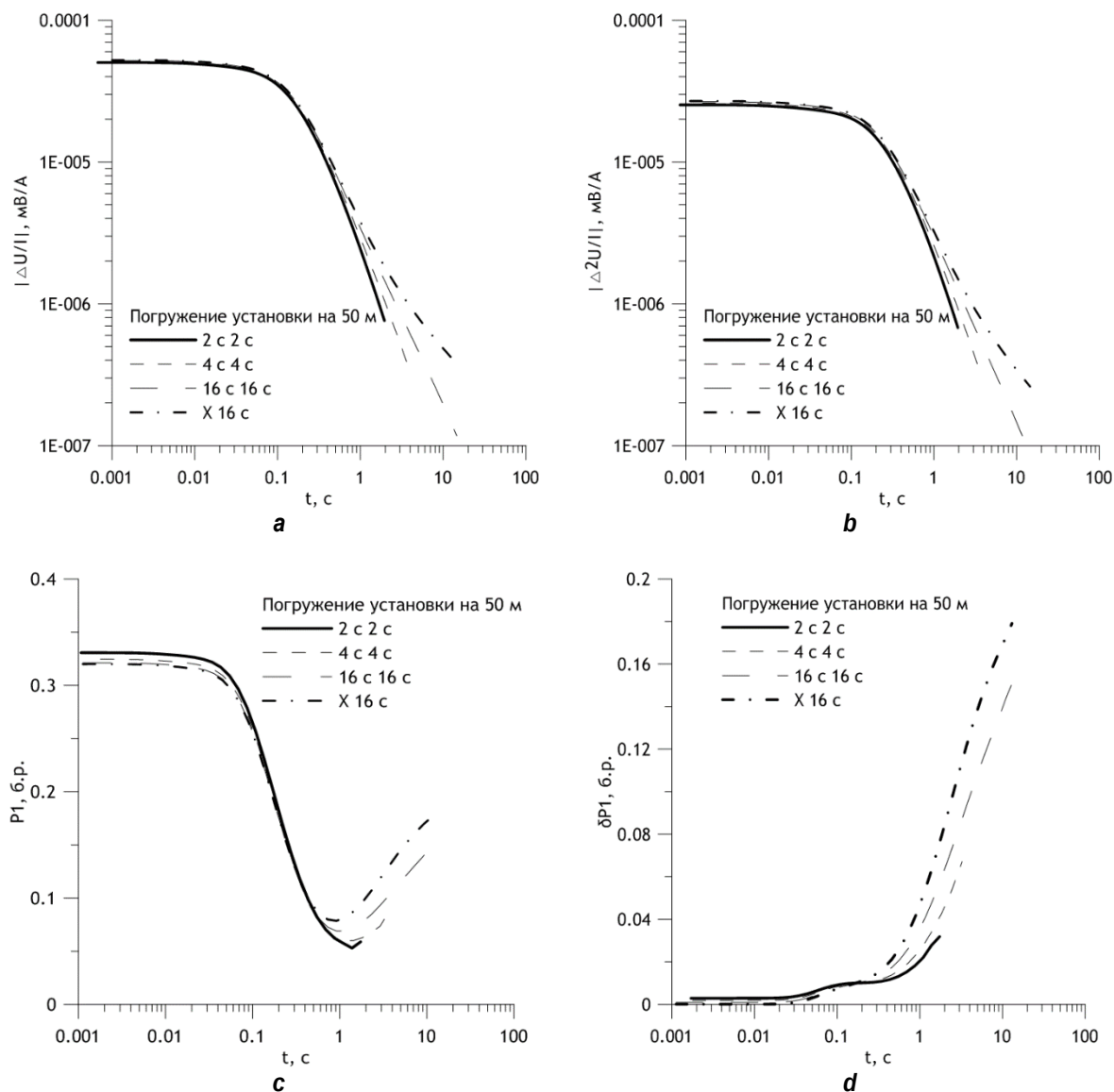


Рис. 2. Расчеты, сделанные для установки, погруженной на глубину 50 м, для разной продолжительности импульса и измерительной паузы:

a – сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$; *b* – конечная разность сигнала переходного процесса $\Delta 2U(t)$; *c* – трансформанта $P1(t)$; *d* – разность трансформант $\delta P1(t)$

Fig. 3. Calculations made for the probe immersed to a depth of 50 m, for different pulse durations and measurement pause:

a – transient signal $\Delta U(t)$; *b* – finite transient signal difference $\Delta 2U(t)$; *c* – transform $P1(t)$; *d* – the difference of the transforms $\delta P1(t)$

продолжительность измерения и импульса и т. д. Сигнал переходного процесса, начавшийся во время выключения тока, имеет знак противоположной полярности относительно знака сигнала, регистрируемого после выключения, поэтому суммарный сигнал уменьшается. Ослабление совокупного сигнала можно видеть на графиках $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$, рассчитанных для разной продолжительности импульса и измерительной паузы (см.

рис. 2). Для одинакового времени регистрации сигнала, равном 16 с, графики, рассчитанные для бесконечного импульса (X 16 с) и для конечного импульса длительностью 16 с (16 с 16 с) различаются.

По виду графиков $P1(t)$ (см. рис. 2, c) можно выделить временные диапазоны переходного процесса, когда он главным образом связан с сигналом становления, а затем – с сигналом ВПГ. Превалирование



сигнала становления определяет убывающую часть кривой $P1(t)$ – со времени около 0,1 с. Минимум значений трансформанты отмечает равенство проявления двух составляющих. Восходящая ветвь связана с затуханием становления и большим влиянием сигнала ВП (переход от преобладающего влияния на переходный процесс распределения вихревых токов к более значимому влиянию распределения токов ВПГ).

Величина $\delta P1(t)$ показывает различие трансформант $P1(t)$ от проводящей модели и от проводящей модели с поляризующимся основанием на одинаковой глубине для одной и той же формы сигнала (см. рис. 2, d), ее различие определяется НЧД геологической среды:

$$\delta P1(t) = P1_{0\%}(t) - P1_{15\%}(t),$$

где $P1_{0\%}(t)$ – сигнал трансформанты $P1(t)$ проводящей модели, $P1_{15\%}(t)$ – сигнал трансформанты $P1(t)$ проводящей модели с поляризующимся основанием.

На трансформанте $P1(t)$ от бесконечного импульса минимум проявляется на более раннем времени, при конечном времени импульса превалирование ВПГ над становлением отмечается на более позднем времени. Можно предположить, что сигнал ВПГ, возникший во время

включения импульса и имеющий противоположный знак, ослабляет сигнал этой же природы, возникший во время выключения.

Заключение

По виду кривых $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$, $P1(t)$ и расхождению $\delta P1(t)$ можно утверждать, что для изучения поляризационного процесса и поляризационных свойств геологической среды, перекрытой водной толщей, оптимальным условием измерений будет использование более продолжительных импульсов и регистрация сигнала до больших времен. Для практических измерений, проходящих при буксировании установки, продолжительность времени импульсов и времени измерений влияет на количество измеренных переходных процессов в единице длины линии профиля. Соответственно, придется ограничивать время импульса и измерений, чтобы улучшить возможности статистического выделения полезного сигнала на фоне помех. Но эти ограничения в то же время должны позволить зарегистрировать и проявление процесса ВПГ в общем сигнале. Для исследуемой модели достаточной продолжительностью токового импульса можно считать 4 с и такую же продолжительность измерений.

Библиографический список

1. Малицкий Я.П., Гавельганц А.А., Коган Л.И. [и др.]. Морские геофизические исследования. М.: Недра, 1977. 375 с.
2. Sainson S. Electromagnetic seabed logging. Cham: Springer International Publishing, 2017. 549 p.
3. Ситников А.А., Агеев Е.В., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 42–49.
4. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002. 135 с.
5. Chave A.D., Constable S.C., Edwards R.N. Electrical exploration methods for the seafloor // Electromagnetic methods in applied geophysics / eds. M.N. Nabighian. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1991. P. 931–966.
6. Вишняков А.Э., Лисицын Е.Д., Яневич М.Ю. Влияние временных параметров вызванной поляризации залежей углеводородов на переходные процессы электромагнитного поля // Техника и методика геофизических исследований Мирового океана: сб. науч. тр. Л.: Севморгеология, 1988. С. 124–132.
7. Агеев Е.В., Ситников А.А., Пестерев И.Ю., Попков А.В., Воднева Е.Н. Переходный процесс на заземленных линиях над поляризующейся Землей // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. № 3. С. 288–305.
8. Агеев Е.В., Ситников А.А., Пестерев И.Ю. Проявление разных типов вызванной поляризации в электромагнитных измерениях заземленной линией // Геофизика. 2018. № 2. С. 37–43.
9. Воднева Е.Н., Агеев Е.В., Ситников А.А., Проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях



переходного процесса на морских акваториях глубиной до 100 м // *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 461–475. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>

10. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // *Геофизика*. 2000. № 5. С. 21–26.

11. Легайдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // *Геофизика*. 1995. № 4. С. 42–45.

12. Легайдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред. *Геофизика*. 1997. № 3. С. 49–56.

References

1. Malovitskii YaP, Gagel'gants AA, Kogan LI, et al. *Marine geophysical survey*. Moscow: Nedra; 1977. 375 p. (In Russ.)

2. Sainson S. *Electromagnetic seabed logging*. Cham: Springer International Publishing; 2017. 549 p.

3. Sitnikov AA, Ageenkov EV, Ivanov SA, Zhugan PP, Maltsev SKh. Equipment, devices and surveying systems to solve the problems of oil and gas exploration and engineering geology in water areas with application of DNME and NDEMS electrical prospecting methods. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* = Devices And Systems of Exploration Geophysics. 2017;60(2):42–49. (In Russ.)

4. Moiseev VS. *IP method for oil prospecting*. Novosibirsk: Nauka; 2002. 135 p. (In Russ.)

5. Chave AD, Constable SC, Edwards RN. Electrical exploration methods for the seafloor. In: Nabighian MN (eds.). *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 1991. p.931–966.

6. Vishnyakov AE, Lisitsyn ED, Yanevich MYu. The influence of IP time parameters of hydrocarbon deposits on the transient processes of the electromagnetic field. In: *Tekhnika i metodika geofizicheskikh issledovaniy Mirovogo okeana* = Technique and methodology of geophysical research of the World ocean. Leningrad: Sevmorgeologiya; 1988. p.124–132. (In Russ.)

7. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IYu,

Popkov AV, Vodneva EN. Transient process on the surface of conductive polarizable Earth on grounded electrical lines. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019;5(3):288–305. (In Russ.)

8. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IYu. Display of induce polarization different types in electromagnetic measurements by the line. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 2018;2:37–43. (In Russ.)

9. Vodneva EN, Ageenkov EV, Sitnikov AA. Manifestation of the low-frequency dispersion of the earth electromagnetic properties in transient measurements for marine waters up to 100 m deep. *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):461–475. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>

10. Petrov AA. TEM potential in prospecting for hydrocarbons in offshore zones. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 2000;5:21–26. (In Russ.)

11. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhinskii NI. Differentially-normed method of electrical prospecting for HC exploration. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 1995;4:42–45. (In Russ.)

12. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhinskii NI. Informativeness of differential methods of electrical prospecting in polarizable medium research. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 1997;3:49–56. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Агеенков Е.В., Воднева Е.Н., Ситников А.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Evgenii V. Ageenkov, Elena N. Vodneva, Akeksandr A. Sitnikov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.



Сведения об авторах / Information about the authors



Агеенков Евгений Валерьевич,
ведущий геофизик Амакинской комплексной геофизической партии,
Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО),
678170, г. Мирный, ул. Вилуйская, 7б, Россия
✉ e-mail: aev@dnme.ru

Evgenii V. Ageenkov,
Leading Geophysicist, Amakinskaya complex geophysical party,
Vilyui Geophysical Survey Expedition, PJSC "ALROSA",
7b Vilyuiskaya St., Mirny 678170, Russia,
✉ e-mail: aev@dnme.ru



Воднева Елена Николаевна,
ведущий инженер,
Лимнологический институт СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,
e-mail: ven21@mail.ru

Elena N. Vodneva,
Leading Engineer,
Limnological Institute, SB RAS,
3 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: ven21@mail.ru



Ситников Александр Анатольевич,
генеральный директор,
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания»,
664044, г. Иркутск, ул. Шапова, 9, Россия,
e-mail: aas@dnme.ru

Aleksandr A. Sitnikov,
CEO,
LLC "Siberian Geophysical Research and Production Company",
9 Shapova St., Irkutsk 664044, Russia,
e-mail: aas@dnme.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.765.061

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-59-65>

Флотационные испытания нового комплексного реагента-собираателя оксидных форм сурьмы на пробе сурьмяной руды месторождения Жипхоша

© Г.В. Михеев^a, С.А. Богйдаев^b

^{a,b}Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данных исследований – применение и изучение нового реагента-собираателя оксидных форм сурьмы для сокращения потерь металла с хвостами. Ведущими способами переработки сурьмяных руд являются гравитационные и флотационные методы обогащения. Основная доля извлекаемой сурьмы при обогащении различных типов сурьмяных руд получена за счет наличия в рудах сульфидной формы металла (антимонита). Потери сурьмы в свою очередь связаны с оксидными минералами (стибнит, валентинит, кermзит), форма нахождения которых представлена в виде пленок, линз или чешуек. Единственным известным способом для извлечения оксидов сурьмы из руд различных месторождений является флотационное обогащение. До сих пор для предприятий, перерабатывающих сурьмяные типы руды, нет разработанных схем и режимов флотационного обогащения, позволяющих получить кондиционные или близкие к кондиционным концентраты из оксидных форм сурьмы. Для извлечения оксидных минералов сурьмы применяются жирнокислотные собиратели катионного типа, углеводороды, нефтяные масла и сланцевая смола. В результате проведения исследований в качестве эффективного собирателя сурьмы выбран новый комплексный реагент-собираитель KC_{Sb} , состоящий из продуктов лесохимического производства и производной аспарагиновой кислоты. Разработан способ флотации окисленных сурьмяных руд с использованием нового реагента-собираителя KC_{Sb} , повышающий технологические и экономические показатели процесса флотации.

Ключевые слова: флотация, обогащение, сурьма, извлечение

Информация о статье: Дата поступления 14 января 2020 г.; дата принятия к печати 12 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Флотационные испытания нового комплексного реагента-собираателя оксидных форм сурьмы на пробе сурьмяной руды месторождения Жипхоша. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 59–65. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-59-65>

Flotation tests of the new complex collecting agent for antimony oxide forms: a case study of the antimony ore sample from the Zhipkhosha deposit

© Gregory V. Miheev^a, Sergey A. Bogidayev^b

^{a,b}Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to study a new collecting agent for antimony oxide forms in order to reduce metal loss with the tails. The main methods for processing antimony ores are gravity and flotation beneficiation. The major amount of antimony extracted through the enrichment of various types of antimony ores is due to the presence of the metal sulfide form (antimonite). Antimony loss, in turn, is associated with oxide minerals (stibnite, valentinite, kermzite) that are present in the form of films, lenses or flakes. The only known method for extracting antimony oxides from the ores of various deposits is flotation concentration. So far, for the enterprises processing antimony ores, there are no developed schemes or regimes of flotation concentration that would allow obtaining conditioned (or close to conditioned) concentrates from oxide antimony forms. To extract antimony oxide minerals, fatty-acid collectors of the cationic type, carbon hydrogen, petroleum oils and shale resin are used. As a result of the research, a new complex collecting agent KC_{Sb} , consisting of wood-chemical products and a derivative of aspartic acid, has been selected as an effective antimony collector. A method of oxidized antimony ore flotation using a new collector reagent KC_{Sb} has been developed. The method increases the technological and economic indexes of the flotation process.



Keywords: flotation, enrichment, antimony, extraction

Information about the article: Received January 14, 2020; accepted for publication February 12, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Miheev GV, Bogidayev SA. Flotation tests of the new complex collecting agent for antimony oxide forms: a case study of the antimony ore sample from the Zhipkhosha deposit. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):59–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-59-65>

Введение

В результате поисковых работ авторами был выбран и изучен новый комплексный реагент-собирающий KC_{Sb} . Физико-химическими методами спектроскопии ядерного магнитного резонанса, хромато-масс- и инфракрасной спектроскопии определен состав KC_{Sb} , который представлен на 31 % насыщенными жирными кислотами (пальмитиновая – 28 %, стеариновая – 3 %) и на 58 % ненасыщенными и полиненасыщенными жирными кислотами (линолевая – 35 %, олеиновая – 23 %). В незначительной мере присутствуют парафины – 7 % (оказывают влияние на поверхностное натяжение) и аспарагиновая кислота – 2 % (создает необходимый баланс при сорбции во флотационном обогащении).

Объектом исследований для испытаний нового комплексного реагента-собирающего KC_{Sb} выбрано месторождение Жипхоша. Руда месторождения представляет собой жильное и жильно-прожилково-вкрапленное кварц-антимонитовое оруденение, основным ценным компонентом которого является сурьма, представленная в свою очередь на 80 % антимонитом и на 20 % стибиконитом, валентинитом. Для обогащения руды разработана гравитационно-флотационная технология [1, 2], извлечение сурьмы по которой составляет 78,5 % при качестве концентрата марки КСУФ-2 44 % (содержание сурьмы – 40–50 %).

Методы исследований

В работе использованы результаты исследований по обогащению сурьмяной руды месторождения Жипхоша. Прове-

дены испытания по флотационному обогащению оксидной формы сурьмы с использованием нового реагента-собирающего KC_{Sb} .

Результаты исследований

При проведении флотационных исследований руды месторождения Жипхоша [3–8] в качестве собирателя оксидных форм металла выбран новый синтезированный реагент-собирающий KC_{Sb} . Реагент состоит из продуктов отходов лесохимической промышленности, которые образуются при сухой обработке леса. Из этого следует, что реагент можно получать на месте производства, а затраты на его изготовление будут минимальны, что в конечном итоге приведет к удешевлению процесса флотационного обогащения.

С помощью физико-химических методов спектроскопии ядерного магнитного резонанса, хромато-масс- и инфракрасной спектроскопии^{1,2} [9–11] определен состав KC_{Sb} , в который вошли три компонента: хлопковый soapсток «Даллес»; водная паста натриевых солей карбоновых кислот «БТ-1С»; натриевые соли производных аспарагиновой кислоты «Аспарал Ф». Основными действующими веществами реагента-собирающего по определенному составу являются насыщенные (31 %), а также ненасыщенные и полиненасыщенные (58 %) жирные кислоты.

При проведении исследований по флотации оксидных форм сурьмы с применением реагента-собирающего KC_{Sb} выбран оптимальный состав составляющих компонентов как 1 : 1 : 0,2 (табл. 1).

¹ Воронов В.К., Сагдеев Р.З. Основы магнитного резонанса: учеб. пособие. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1995. 352 с.

² Казицына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектроскопии в органической химии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1979. 238 с.



Таблица 1

**Определение оптимального соотношения компонентов,
составляющих комплексный реагент-собиратель KC_{Sb}**

Table 1

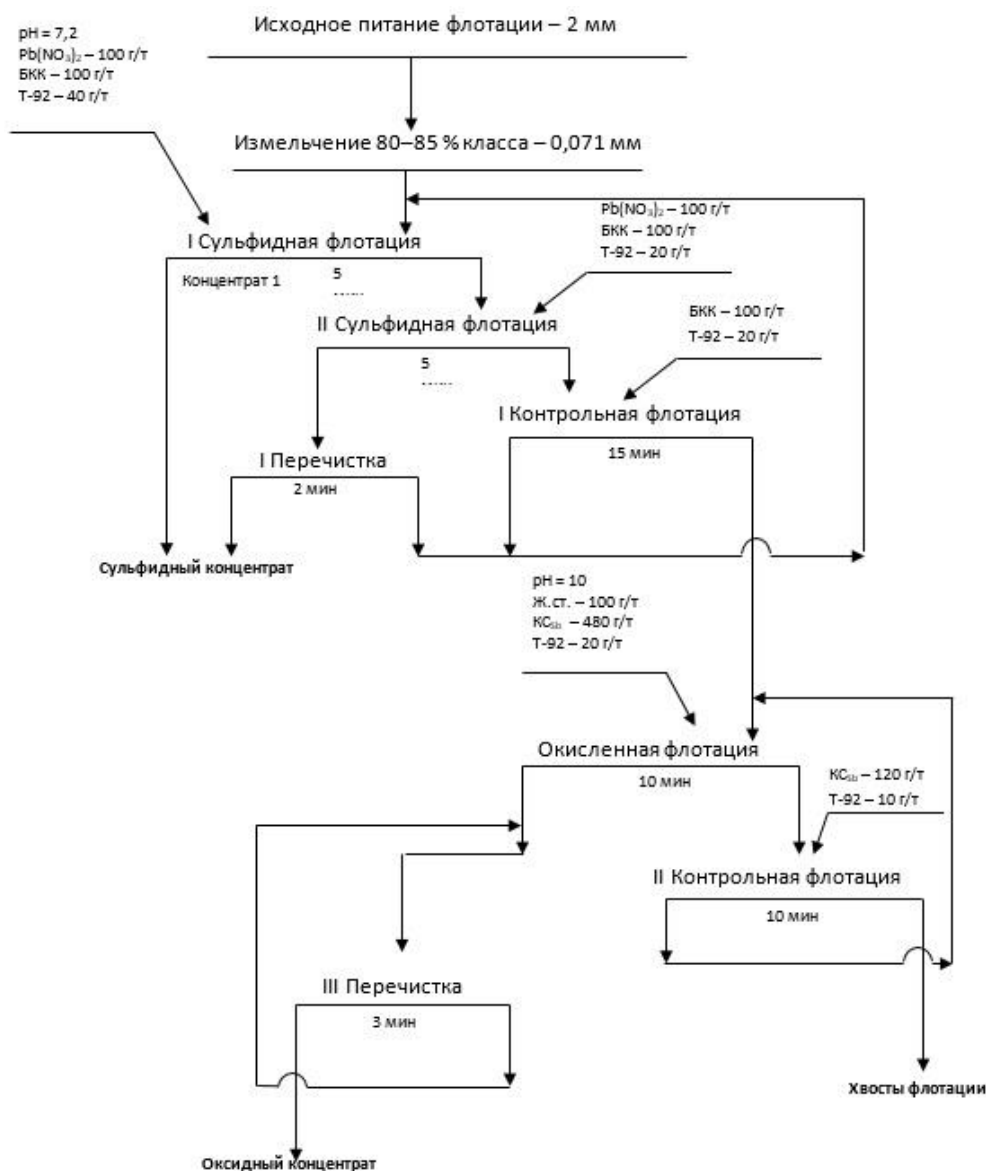
**Determination of the optimal ratio of the components
that make up the complex collecting agent KC_{Sb}**

Наименование	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
Опыт 1 (1 часть «Даллес» : 1 часть «БТ-1С» : 1 часть «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	4,21	17,7	41,4
Хвосты	95,79	1,1	58,6
Сульфидные хвосты	100	1,8	100
Опыт 2 (1 часть «Даллес» : 1 часть «БТ-1С» : 0,5 части «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	4,27	18	42
Хвосты	95,73	1,11	58
Сульфидные хвосты	100	1,83	100
Опыт 3 (1 часть «Даллес» : 1 часть «БТ-1С» : 0,2 части «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	4,15	18,2	42,4
Хвосты	95,85	1,07	57,6
Сульфидные хвосты	100	1,78	100
Опыт 4 (0,5 части «Даллес» : 1 часть «БТ-1С» : 0,2 части «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	4	19	40,2
Хвосты	96	1,18	59,8
Сульфидные хвосты	100	1,89	100
Опыт 5 (0,5 части «Даллес» : 0,5 части «БТ-1С» : 0,2 части «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	3,96	17	38,2
Хвосты	96,04	1,13	61,8
Сульфидные хвосты	100	1,76	100
Опыт 6 (1 часть «Даллес» : 0,5 части «БТ-1С» : 0,2 части «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	3,73	18,8	38
Хвосты	96,27	1,19	62
Сульфидные хвосты	100	1,85	100
Опыт 7 (0,5 части «Даллес» : 0,5 части «БТ-1С» : 1 часть «Аспарал Ф») 600 г/т			
Концентрат	3,63	18,8	37,9
Хвосты	96,37	1,16	62,1
Сульфидные хвосты	100	1,8	100

Из табл. 1 видно, что оптимальное соотношение компонентов комплексного реагента-собирателя принято в опыте 3: 1 часть «Даллес»: 1 часть «БТ-1С»: 0,2 части «Аспарал Ф».

В дальнейшем были проведены контрольные опыты по флотации оксидных форм сурьмы на хвостах сульфидной флотации в оптимальном разработанном

режиме: крупность помола – 80–85 % класса -0,074 мм; pH = 9,5; плотность пульпы – 25 %; расход KC_{Sb} – 600 г/т; расход жидкого стекла – 20 г/т. Время флотации: основной – 10 мин, контрольной – 10 мин, перечистки – 3 мин; время агитации с KC_{Sb} – 3 мин. Схема испытаний приведена на рисунке, результаты отражены в табл. 2.



Технологическая схема испытаний реагента-собираателя КС_{sb} в оптимальных условиях
Flowchart for testing the КС_{sb} collecting agent under optimal conditions

Баланс металла по конечным продуктам флотации

The balance of metal in the final products of flotation

Наименование продукта	Выход, %	Содержание сурьмы, %	Извлечение сурьмы, %
Сульфидный концентрат, в том числе:	12,4	54,55	79,5
концентрат 1	7,34	53	45,7
концентрат 2	5,06	56,8	33,8
Хвосты сульфидной флотации	87,6	1,99	20,5
Оксидный концентрат	5,7	15,1	10,1
Объединенный концентрат	18,1	42,1	89,6
Хвосты окисленной флотации	81,9	1,08	10,4
Итого: исходное питание флотации (хвосты гравитации)	100	8,51	100



Из табл. 2 видно, что извлечение сурьмы в объединенный флотоконцентрат за счет введения в технологическую схему операции флотации оксидных форм сурьмы составляет 89,6 % при качестве концентрата 42,1 % (марка КСУФ-2). Хвосты по содержанию сурьмы при этом снизились до 1,08 %.

При использовании полученных в результате исследований данных были рассчитаны технико-экономические показатели^{3–6} [12–14], которые представлены в табл. 3.

На основании показателей, приведенных в табл. 3, можно сделать вывод о том, что условный экономический эффект

Таблица 3
Технико-экономические показатели флотационного обогащения

Table 3

Technical and economic indexes of flotation enrichment

Наименование показателя	Варианты	
	С применением реагента КС _{Sb}	Без применения реагента КС _{Sb}
Годовая производительность, тыс. т	500	
Содержание сурьмы, %	2	
Масса сурьмы в исходной руде, кг	10000	
Поступило		
Хвосты гравитации, тыс. т	122,3	
Содержание сурьмы в хвостах гравитации, %	5,72	
Масса сурьмы в хвостах гравитации, кг	6996	
Извлечение сурьмы, %	70	
Расход КС _{Sb} , т/г	3,4	0
Цена КС _{Sb} , тыс. руб./т	25	0
Стоимость КС _{Sb} , тыс. руб.	85	0
Получено		
Извлечение в сульфидный флотоконцентрат от питания флотации, %	79,5	
Извлечение в окисленный флотоконцентрат от питания флотации, %	10,1	–
Концентрат сульфидной флотации, т	5561,471	
Концентрат окисленной флотации, т	706,552	–
Содержание сурьмы в сульфидном концентрате, %	54,55	
Содержание сурьмы в окисленном концентрате, %	15,1	–
Цена сурьмы, руб./т концентрата	500000	550000
Стоимость сурьмы, полученной из флотоконцентрата, тыс. руб.	3134011,5	3058809,05
Итого доходы, тыс. руб.	3134011,5	3058809,05
Итого расходы, тыс. руб.	2180027	2135204
Условная прибыль, тыс. руб.	953984,5	923605,05

³ Ковалев В.В., Волкова О.Н. Анализ хозяйственной деятельности предприятия: учебник. М.: Проспект, 2007. 424 с.

⁴ Гомола А.И., Кириллов В.Е., Жаннин П.А. Экономика для профессий и специальностей социально-экономического профиля: учеб. пособие. М.: Академия, 2017. 351 с.

⁵ Об утверждении методических рекомендаций по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых: распоряж. Министерства природных ресурсов РФ от 05.06.2007 г. № 37-р // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902305753> (11.01.2020).

⁶ Титов В.И. Экономика предприятия: учебник. М: Эксмо, 2008. 411 с.



от введения в технологическую схему флотации оксидных форм сурьмы с применением нового реагента-собирающего КС_{Sb} составит порядка 30 млн руб. в год.

Заключение

Полученные в ходе проведенных исследований по флотационному обогащению оксидных форм сурьмы месторождения Жипхоша с использованием нового реагента-собирающего КС_{Sb} данные показали эффективность включения

этого конкретного узла в общую технологическую схему обогащения. В результате увеличен выход сурьмы в товарный флотоконцентрат и сокращены потери с хвостами до 10,4 %.

На основании вышеизложенного реагент-собирающий КС_{Sb} рекомендуется использовать в технологических схемах месторождений, содержащих трудноизвлекаемые оксидные формы сурьмы.

Библиографический список

1. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б. Разработка метода селективной флотации сульфидов сурьмы и мышьяка при обогащении комплексных золотосодержащих руд // Цветные металлы. 2019. № 4. С. 6–12.
2. Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых: сб. науч. тр. / отв. ред. А.М. Гольман, В.А. Чантурия. М.: Наука, 1989. 210 с.
3. Solozhenkin P.M., Alekseev A.N. Innovative processing and hydrometallurgical treatment methods for complex antimony ores and concentrates. Part I // Journal of Mining Science. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 203–209.
4. Соложенкин П.М. Развитие принципов выбора реагентов для флотации минералов сурьмы и висмута // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 5. С. 559–562. <https://doi.org/10.7868/S0869565216050145>
5. Соложенкин П.М., Зинченко З.И. Обогащение сурьмяных руд. М.: Наука, 1985. 179 с.
6. Мязин В.П. Флотационное обогащение и металлургия сурьмяных руд: монография. Чита: Изд-во ЧТГУ, 2015. 156 с.
7. Агарова Н.Е., Козмина А.А., Яковлева Л.М., Краюхин С.А. Оптимизация режимов получения сурьмянисто-оловянного концентрата // Цветные металлы. 2019. № 2. С. 33–38.

8. Соложенкин П.М. Проблемы обогащения и переработки золото-сурьмяных руд Российской Федерации // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в XXI веке (Плаксинские чтения 2019): материалы Междунар. совещ. Иркутск, 2019. С. 172–175.
9. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарв Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия, 2000. 408 с.
10. Ионин Б.И., Ершов Б.А., Кольцов А.И. ЯМР-спектроскопия в органической химии. Л.: Химия, 1983. 269 с.
11. Алексеева К.В. Пиролитическая газовая хроматография. М.: Химия, 1985. 256 с.
12. Малахов Р.Г. Экономическая теория. М.: Рид Групп, 2016. 448 с.
13. Поляков О.А., Минин В.В., Лизункин М.В. Состояние, проблемы и перспективы развития горнопромышленного комплекса Забайкальского края // Горный журнал. 2011. № 3. С. 4–7.
14. Соложенкин П.М. Перспектива возобновления производства сурьмы и ее соединений в России: сурьмяные, золотосурьмяные месторождения РФ и технологии их инновационной переработки // Проблемы и перспективы комплексного освоения сохранения земных недр: материалы 2-й Междунар. науч. шк. акад. К.Н. Трубочко. М., 2016. С. 377–381.

References

1. Matveeva TN, Gromova NK, Lantsova LB. Developing a method for selective flotation of antimony and arsenic sulfides in enriching complex gold-bearing ores. *Tsvetnye metally*. 2019;4:6–12. (In Russ.)
2. Gol'man AM, Chanturiya VA. *New processes in combined mineral treatment schemes*. Moscow: Nauka; 1989. 210 p. (In Russ.)
3. Solozhenkin PM, Alekseev AN. Innovative processing and hydrometallurgical treatment methods for complex antimony ores and concentrates. Part I. *Journal of Mining Science*. 2010;46(2):203–209.

4. Solozhenkin PM. Developing the principles of the reagent selection in the flotation of antimony and bismuth minerals. *Doklady Akademii nauk*. 2016;466(5):559–562. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565216050145>
5. Solozhenkin PM, Zinchenko ZI. *Enrichment of antimony ores*. Moscow: Nauka; 1985. 179 p. (In Russ.)
6. Myazin VP. *Flotation enrichment and metallurgy of antimony ores*. Chita: Chita State Technical University; 2015. 156 p. (In Russ.)
7. Agarova NE, Kozmina AA, Yakovleva LM, Krayukhin SA. Optimizing antimony-tin concentrate



production modes. *Tsvetnye metally*. 2019;2:33–38. (In Russ.)

8. Solozhenkin PM. Beneficiation and processing of antimony ores in the Russian Federation. In: *Problemy i perspektivy effektivnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya v XXI veke (Plaksinskie chteniya-2019): materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya* = Issues and prospects for effective treatment of mineral raw materials in the 21st century (Plaksinsky readings, 2019). Irkutsk; 2019. p.172–175. (In Russ.)

9. Kalabin GA, Kanitskaya LV, Kushnarev DF. *Quantitative NMR spectroscopy of natural organic raw materials and products of their processing*. Moscow: Khimiya; 2000. 408 p. (In Russ.)

10. Ionin BI, Ershov BA, Koltsov AI. *NMR spectroscopy in organic chemistry*. Leningrad: Khimiya; 1983. 269 p. (In Russ.)

11. Alekseeva KV. *Pyrolytic gas chromatog-*

raphy. Moscow: Khimiya; 1985. 256 p. (In Russ.)

12. Malakhov R.G. *Theory of economics*. Moscow: Rid Grupp; 2016. 448 p. (In Russ.)

13. Polyakov OA, Minin VV, Lizunkin MV. The current state, problems and development prospects of the mining complex of Transbaikalia Territory. *Gornyi zhurnal*. 2011;3:4–7. (In Russ.)

14. Solozhenkin PM. The prospect for resuming the production of antimony and its compounds in Russia: antimony and gold antimony deposits of the Russian Federation and innovative processing technologies. In: *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya sokhraneniya zemnykh nedr: materialy 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi shkoly akademika K.N. Trubetskogo* = Issues and prospects of the integrated development and conservation of the Earth interior: Proceedings of the 2nd International Scientific school of K.N. Trubetskoy. Moscow; 2016. p.377–381. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Михеев Г.В., Богйдаев С.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Gregory V. Miheev, Sergey A. Bogidayev are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Михеев Григорий Владимирович,
старший научный сотрудник,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия,
✉ e-mail: miheev@irgiredmet.ru

Gregory V. Miheev,
Senior Researcher,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia,
✉ e-mail: miheev@irgiredmet.ru



Богйдаев Сергей Александрович,
доктор технических наук,
научный сотрудник,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия,
e-mail: fluorit2001@mail.ru

Sergey A. Bogidayev,
Dr. Sci. (Eng.),
Researcher,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia,
e-mail: fluorit2001@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 552.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-66-76>

Состав проб песка юго-западных и центральных районов Прибайкалья

© Е.А. Гусева^a, М.В. Константинова^b^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данного исследования являлось минералогическое изучение проб песка, отобранных на юго-западном побережье оз. Байкал вблизи некоторых населенных пунктов и в п. Хужир, для определения ряда его характеристик, позволяющих сделать вывод о возможности применения песка для нужд пищевой промышленности и пищевой инженерии. Для определения гранулометрического состава песка был использован метод ситового анализа, предполагающий разделение сыпучей смеси на отдельные фракции посредством вибрации с использованием комплекта сит, определение массы каждой фракции и процентного соотношения фракций в исследуемом веществе. Рентгеноструктурный анализ проб песка, произведенный при помощи дифрактометра Bruker D8 Advance, позволил определить фазовый состав вещества и выделить в образцах преобладающие структуры. По результатам проведенного рентгенографического анализа определена кристаллическая структура составляющих минералов. Установлено, что минералогический состав в наибольшей степени представлен кварцем – в разных пробах его доля составляла от 40 до 60 %. Альбит и анортоклаз в данных пробах присутствуют в количестве от 15 до 30 %. Незначительную долю в каждой пробе представляют минералы диккит и индиалит – менее 5 %. В песке, взятом на исследование в п. Ангасолка, около 9 % составляет антофиллит. Результаты ситового анализа после соответствующей обработки показали следующее. Большинство проб по зерновому составу достаточно однородны, в каждой пробе имеется преобладающая фракция. Исключение представляет проба песка из г. Слюдянки, в которой наблюдается большой разброс размеров частиц. Песок отобранных проб может быть классифицирован как озерный или озерно-ледниковый. Кристаллохимический состав достаточно разнообразен. Установлено, что основной составляющей песков являются кварц и полевошпат, присутствует небольшое количество других минералов. Результаты определения гранулометрического состава свидетельствуют о том, что для песка с побережья вблизи г. Слюдянки характерен большой разброс размеров частиц, в остальных пробах сыпучего материала имеется преобладающая фракция. Для целевого использования в пищевой отрасли наиболее подходящим является песок г. Байкальска, поскольку в пробе преобладает фракция среднего размера.

Ключевые слова: песок, минеральное сырье, минералогический состав, генезис, гранулометрия

Информация о статье: Дата поступления 14 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 11 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Гусева Е.А., Константинова М.В. Состав проб песка юго-западных и центральных районов Прибайкалья. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 66–76. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-66-76>

Composition of sand samples from southwest and central areas of Transbaikalia

© Elena A. Guseva^a, Marina V. Konstantinova^b^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: A study of the characteristics of the sand samples from the southwest shore of Lake Baikal has been carried out, with the purpose to find out the possibility of using the sand for the needs of the food industry. To determine the granulometric composition of the sand, a sieve analysis method has been applied, i.e. the separation of the granular mixture fractions using a set of sieves, with the further determination of the mass of each fraction and their percentage in the test substance. The sieving has been carried out by means of vibration. The X-ray analysis of the sand samples has used a Bruker D8 Advance diffractometer. The method allows determining the parameters of the crystal lattices, analyzing the phase composition of the test substance, and identifying the prevailing structures in the sample. Based on the x-ray analysis results, the crystal structure of the mineral components has been determined. The study has shown the following mineralogical composition of the sand. The prevailing mineral is quartz, its content varying from 40 to 60 percent; the content of albite and anorthoclase is 15 to 30 percent,



and a small fraction is represented by dikeite and indialite (less than 5 percent). In the sand samples taken in the settlement of Angasolka, about 9 percent is represented by antophyllite. The processed results of the sieve analysis show the following. Most samples have been found to be quite homogeneous in terms of their grain composition, each sample having a predominant fraction, with the exception of the sample taken in the town of Slyudyanka, in which the particle size varies significantly. The studied sand samples can be classified as lacustrine or lake-glacial, their crystal-chemical composition being quite diverse. The study shows that the main components in the sand composition are quartz and feldspar, with a small content of other minerals being present. The granulometric analysis results show that the sand samples taken at the lakeshore in the vicinity of Slyudyanka are characterized by a large dispersion of the particle sizes, while other samples of the bulk material contain a predominant fraction. The sand from the Baikalsk area is most suitable for use in the food industry as it contains middle size fractions.

Keywords: sand, mineral raw materials, mineralogical composition, genesis, granulometry

Information about the article: Received November 14, 2019; accepted for publication December 11, 2019; available online March 30, 2020.

For citation: Guseva EA, Konstantinova MV. Composition of sand samples from southwest and central areas of Transbaikalia. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):66–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-66-76>

Введение

В различных источниках [1–4] подробно описано широкое применение песка в строительной сфере. Область применения песка постоянно расширяется благодаря его качествам и природным свойствам, вследствие чего он находит свое применение в различных сферах деятельности человека. Многогранность использования обусловлена его физическими и химическими свойствами, которые в свою очередь находятся в тесной связи с происхождением этой горной породы, с ее составом.

Вызывает интерес вопрос о возможности применения песка для нужд пищевой промышленности и пищевой инженерии. Чтобы ориентироваться в этой области, необходимо представлять, какие существуют разновидности песка, какими свойствами он обладает. Важно выделить те характеристики песка, которые позволили бы шире применять этот материал для разных целей в пищевой отрасли и, возможно, позволят предложить новое нетрадиционное его применение.

Материал и методы исследования

Объектом исследования были выбраны песочные пробы, отобранные на юго-западном побережье оз. Байкал, вблизи водной полосы у некоторых населенных пунктов, а также на о. Ольхон.

На карте (рис. 1) метками обозначены места, в которых был взят материал

для дальнейшей работы, а именно: г. Слюдянка, г. Байкальск, п. Ангасолка, падь Обутеиха, п. Хужир.

Каждая из отобранных проб имела достаточно однородную структуру, однако они заметно различались по внешнему виду и цвету, размеру зерен и форме частиц, блеску, наличию посторонних примесей.

Исследование песков производилось в различных направлениях, получен обширный экспериментальный материал [5–7].

В данной работе в качестве предмета исследования были выделены минералогический состав песка и его гранулометрический состав. Для исследования использовались методы ситового и рентгеноструктурного анализов.

Ситовой анализ. В настоящее время существует достаточно большое количество методов определения гранулометрического состава сыпучих материалов. Гранулометрический анализ подразумевает разделение сыпучей смеси на отдельные фракции, определение массы каждой фракции и их процентного соотношения в исследуемом веществе. В данной работе был использован метод ситового анализа. Для этого использовали стандартный комплект из семи сит. Метод предполагает рассев сыпучей пробы посредством вибрации, которая создается при помощи вибпропривода.

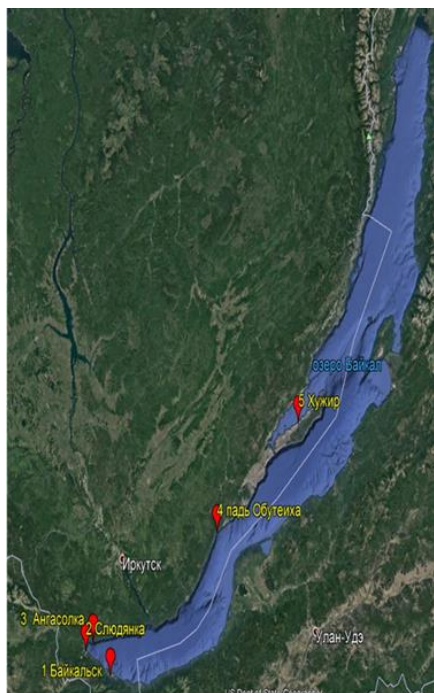


Рис. 1. Месторасположение точек отбора проб песка

Fig. 1. Location of the sampling sites

Масса каждой пробы песка равнялась 200 г. Взвешивание песка производилось на электронных весах «ОКБ Веста», которые показывают массу с точностью до третьего знака после запятой.

Диаметр отверстий сит составлял 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063; менее 0,063 мм.

Сита смонтированы в колонну в порядке увеличения отверстий снизу вверх.

По завершении рассева взвешиванием определяли массу каждой фракции песка, которая задержалась на определенном сите, и рассчитывали ее долю.

Результаты проведенного исследования были обработаны соответствующим образом и представлены в виде графического материала на рис. 2.

Рентгеноструктурный анализ. Рентгеноструктурный анализ в настоящее время широко применяется как метод исследования строения вещества с использованием рентгеновских лучей с целью определения параметров кристаллических решеток и структуры, определения фазового состава исследуемого вещества, анализа преобладающих структур в образце [8]. Данный метод признан одним из основных при определении структуры кристаллов, составляющих их соединений [9]. Он наиболее информативен и дает наиболее точную картину, при этом не разрушает и не искажает вещество. Рентгенография позволяет провести как качественный, так и количественный анализ составляющих частей вещества.

В предлагаемой работе был произведен рентгеноструктурный анализ проб песка при помощи дифрактометра Bruker D8 Advance, который позволяет получить достаточно точные экспериментальные данные.

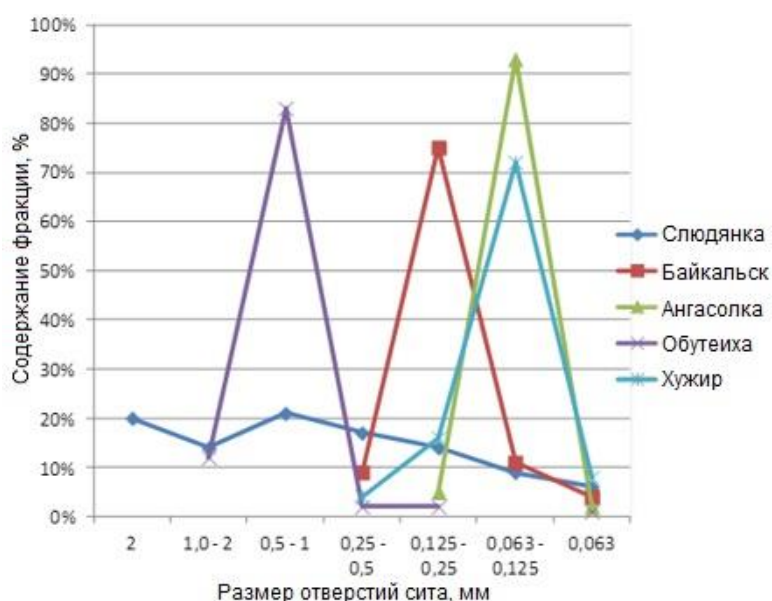


Рис. 2. Гранулометрический состав проб песка

Fig. 2. Granulometric composition of the sand samples



Образцы для исследования готовили следующим образом. Небольшое количество песка смешивали со связующим материалом, в качестве которого брали вазелин. Пробу помещали в рентгеновскую кювету, поверхность пробы ровняли, сверху пробу фиксировали стеклянной пластиной для обеспечения параллельности краю кюветы.

При проведении исследований прибор настраивался на оптимальный режим, фиксировался дифракционный спектр исследуемого материала. Регистрация рентгенограмм производилась в автоматическом режиме с помощью регистрационного устройства. Полученные результаты в виде дифрактограмм расшифровывали и обрабатывали при помощи программы Toras 3.0. Это позволило оценить кристаллохимический состав изученных проб.

Результаты исследования и их обсуждение

Пески и песчанки наряду с глинами являются одними из наиболее распространенных типов осадочных пород оболочки планеты. Они занимают обширную часть поверхности Земли, встречаются повсеместно, используются человеком с древних времен.

Песок – это рыхлая обломочная горная порода, состоящая из округлых и угловатых обломков различных минералов и горных пород размером от 0,1 до 2 мм. По преобладающему размеру зерен подразделяется на мелкозернистый (от 0,1–0,25 мм), среднезернистый (0,25–0,5 мм), крупнозернистый (>0,5 мм); по минералогическому составу – на моно- и полиминеральный. Иногда имеет примеси пылеватых и глинистых частиц, при содержании их более 10 % переходит в супесь. Чаще всего образуется при измельчении (дроблении, истирании, размалывании) более крупных обломков горных пород, реже – в результате роста минеральных зерен¹. Искусственный

песок получают путем дробления природных и синтезированных минералов.

В работе [10] определяют песок как рыхлый, несцементированный зернистый материал, зерна или каркасообразующие элементы которого по своим размерам должны соответствовать градациям, принятым для песков. Размеры песчинок ограничены пределами 0,0625–2 мм в диаметре, на самом деле предел колебаний размеров зерен более значителен.

По минеральному составу наиболее распространенным является кварцевый, глауконито-кварцевый, полевошпатово-кварцевый и слюдястый песок. В песке могут присутствовать и ценные минералы: золото, платина, алмаз, сапфир, рубин, циркон, рутил, титанит, ильменит (такие месторождения называются россыпями).

Таким образом, песок различается по размерам и форме зерен, своему минеральному составу, количеству и качеству примесей, способу и месту образования и местонахождения. По происхождению можно также выделить природный и искусственный песок.

Песок представляет собой непрерывно воспроизводимое минеральное сырье. Количество песка на планете постепенно увеличивается по причине дезинтеграции горных пород, эти естественные процессы постоянны и необратимы.

Традиционное использование песка – в сфере промышленного, гражданского и дорожного строительства, в металлургии, стекольной промышленности [11, 12]. Это предполагает огромные объемы его добычи, что не может не отражаться на окружающей среде. Нерегулируемая грабительская разработка месторождений песка приводит к пагубным последствиям [13, 14]. Происходят необратимые изменения ландшафта, оскудение животного и растительного мира, нарушение баланса биосферы.

¹ Песок // География. Современная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://gufo.me/dict/geography_modernenc/песок (29.04.2019).



Ухудшаются экологическая обстановка и условия проживания населения, вплоть до возникновения опасных эпидемий. Хищнический подход к добыче песка провоцирует экономические войны за возможность обладания этим важным минеральным ресурсом, что зачастую приводит к социальной нестабильности [15, 16].

Свойства песка продолжают вызывать интерес и являться объектами изучения до настоящего времени [17, 18]. Многие характеристики песка зависят в первую очередь от его минерального и гранулометрического составов. С точки зрения использования этого материала в пищевой отрасли представляют интерес конкретные характеристики. Так, пористость, фильтрующая и поглощающая способность, насыпная плотность определяют объем и эффективность работы фильтрующего оборудования, предназначенного для очистки технологических жидкостей. Насыпная (объемная) плотность, теплоемкость и теплопроводность определяют габариты и показатели работы устройств, предназначенных для аккумуляции тепла.

В настоящее время существует достаточно много подходов, которые позволяют классифицировать месторождения песков по их происхождению² [19]. В нашей работе рассмотрим классифика-

цию песков, предложенную в трудах П.И. Фадеева [20–22]. Данная классификация предусматривает тесную связь генезиса песков с процессами, которые протекают в результате выветривания земной поверхности. Под выветриванием понимают разрушение горных пород в результате протекания экзогенных и эндогенных процессов. В зависимости от факторов, приводящих к образованию песка, различают физическое (механическое) выветривание, происходящее в результате разницы температур, действия воды и воздуха, таяния льда, движения ветра, приводящее к разрушению минералов и дроблению пород с образованием обломков разной крупности, а также химическое выветривание, происходящее в результате реакции минералов и воды, пара и газов, приводящее к изменению химического состава, вследствие чего могут образовываться новые минералы. В природе все процессы зачастую протекают одновременно. Такой подход к классификации песков отражен в таблице.

Следующим за процессом выветривания этапом является процесс денудации, который представляет собой удаление и перемещение частиц, образовавшихся вследствие выветривания. Перенос частиц осуществляется благодаря силам природы: воды, ветра и льда. Во время

Генетическая классификация видов песков [21] Genetic classification of the sand types [21]

Процесс			Генетический тип песков	Разновидность песков
Выветривание			Элювиальные	–
Денудация	Деятельность воды	Дождевой и талой	Делювиальные, пролювиальные	–
		Речной	Аллювиальные	Русловые, дельтовые, пойменные
		Ледниковой	Водно-ледниковые	Флювио-гляциальные, озовокамовые
		Озерной морской	Озерные, морские	Прибрежные, глубинные
	Деятельность льда		Ледниковые (моренные)	–
	Деятельность ветра		Эоловые	Дюнные, барханные, бугристо-кучевые

² Грунтоведение: учеб. для вузов / ред. Е.М. Сергеев. М.: Изд-во МГУ, 1983. 392 с.



перемещения частиц водой, ледниками, ветром возникают сортированные обломочные породы, именно к таким и относят пески.

Генетический тип предполагает определенную совокупность сходных признаков [16]. Самыми распространенными песками являются аллювиальные, ледниковые (моренные), водно-ледниковые, морские, эоловые, элювиальные и делювиальные пески.

Пески по происхождению подразделяют на следующие группы: озерные, морские, речные, ветровые, овражные (карьерные)³ [23, 24]. Кроме рассмотренной выше классификации песков по происхождению в литературных источниках описана классификация по местам их залегания.

Таким образом, песок отобранных проб можно классифицировать как озерный или озерно-ледниковый, что хорошо согласуется с результатами схожих исследований [25]. В то же время в литературе встречается описание песков по происхождению озерно-ледниковых (район Тункинской долины) и эоловых (Северо-западное побережье о. Ольхон) [26, 27].

Пробы песка заметно различались по внешнему виду, что позволяет предположить его разный состав и происхождение.

Проба, взятая в г. Слюдянке, имеет коричневый цвет темных и светлых оттенков, неоднородна по составу, отличается размерами зерен – встречаются достаточно крупные зерна. Проба, взятая в г. Байкальске, однородная, с примерно одинаковыми некрупными зернами ровного светло-коричневого цвета. Проба, взятая в п. Ангасолка, имеет серо-коричневый цвет с темными вкраплениями, внешне частицы примерно равные по размеру. Проба из пади Обутеиха имеет округлые зерна средней крупности

разной цветовой гаммы, в которой присутствуют черный, белый, коричневый цвета. Проба, отобранная в п. Хужир, имеет мелкие зерна темно-коричневого цвета с черными составляющими.

Минералогический состав песков определяется составом исходных горных пород, условиями их разрушения, переноса и переотложения продуктов разрушения⁴. Обработанные данные результатов проведенного рентгенографического анализа проб песка представлены ниже:

– падь Обутеиха: кварц (SiO_2) – 56,39 %; альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) – 23,18 %; анортотлаз ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) – 15,37 %; дикиит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 1,39 %; индиалит ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) – 3,67 %;

– г. Байкальск: кварц (SiO_2) – 59,29 %; альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) – 16,02 %; анортотлаз ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) – 23,61 %; дикиит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 2,29 %; индиалит ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) – 1,79 %;

– п. Ангасолка: кварц (SiO_2) – 23,23 %; альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) – 27,73 %; анортотлаз ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) – 36,17 %; дикиит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 1,58 %; индиалит ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) – 2,52 %; антофиллит ($(\text{Mg},\text{Fe})_7(\text{OH})_2[\text{Si}_8\text{O}_{22}]$) – 8,75 %;

– п. Хужир: кварц (SiO_2) – 35,81 %; альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) – 29,92 %; анортотлаз ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) – 31,78 %; дикиит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 0,7 %; индиалит ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) – 2,74 %.

Анализ полученных данных показывает, что минералогический состав в наибольшей степени представлен кварцем. Данный минерал преобладает в пробах, отобранных в пади Обутеиха и г. Байкальске, его доля составляет около 60 %. В пробе п. Хужир кварц также является наибольшей составляющей – около 40 %. Для кристаллов кварца характерно поперечное удлинение, блеск и различный цвет, но чаще он имеет молочно-белые или серые окраски. Альбит и анортотлаз в данных пробах составляют от 15

³ Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология: учеб. для вузов. Л.: Недра, 1978. 496 с.

⁴ Кауричев И.С., Панов Н.П., Розов Н.Н., Стратонович М.В., Фокин А.Д. Почвоведение: учеб. для вузов. М.: Агропромиздат, 1989. 722 с.



до 30 %. Эти минералы относятся к полевым шпатам, которые также распространены и часто встречаются в полевых условиях. Зерна у них окатанной формы с неметаллическим блеском. Незначительную долю в каждой пробе исследуемого материала представляют минералы диккит и индиалит, они составляют менее 5 %. В песке, взятом на исследование в п. Ангасолка, около 9 % составляющей минеральной характеристики присущ антофиллит – минерал ромбической формы, чаще всего коричневого цвета с металлическим блеском.

Таким образом, кристаллохимический состав исследуемых нами песков достаточно разнообразен, но в своем большинстве пески состоят из кристаллов кварца и полевого шпата, процент вторичных минералов минимален, что хорошо согласуется с литературными данными. Отмечается, что минералогический состав песков в основном полевошпатово-кварцевый (30 и 60 % соответственно)⁵. Это прослеживается и в полученных нами данных: кварц по результатам рентгеноструктурного анализа является преобладающей составляющей в пробах исследуемого материала.

Визуальная оценка изученных проб песка показала, что взятая в г. Слюдянке проба имеет разный размер зерен: встречаются крупные зерна и мелкие частицы, присутствующие примерно в равных пропорциях. Остальные пробы, взятые в г. Байкальске, п. Ангасолка, пади Обутеиха и на о. Ольхон в п. Хужир, характеризуются более однородным размером частиц средней крупности ближе к мелкому, примерно одинаковых по величине.

Был проведен ситовой анализ для определения гранулометрического состава сухого материала. В результате исследования получены данные, которые после математической обработки представлены в виде графика зависимости процентного содержания каждой фракции песка от размера отверстия соответствующего сита (см. рис. 2).

После анализа полученных данных установлено следующее. В пробе из г. Слюдянки более 40 % принадлежит фракциям 0,5–1 и 2 мм. 17 % – фракции, в которой размер зерен соответствует ячейки сита, равной 0,25–0,5 мм, и по 14 % – фракциям размерами 1–2 и 0,125–0,25 мм. Таким образом, в данной пробе песка наблюдается большой разброс размеров частиц. Остальные пробы сыпучего материала по зерновому составу более однородны, в каждой пробе имеется преобладающая фракция. В песке г. Байкальска преобладающей является мелкая фракция, которая соответствует ячейки сита, равной 0,125–0,25 мм – ее доля составляет 75 %. В песке, взятом на исследование в пади Обутеиха, размер песчинок в основном варьирует в пределах 0,5–1 мм – доля этой фракции составляет 83 %, что позволяет рассматривать этот материал как среднезернистый. Мелкозернистый или тонкий песок является основным в пробах из п. Ангасолка и Хужир. В этих пробах преобладают фракции песка, равные ячейкам сита от 0,063–0,125 мм – данная фракция составляет 72 % песка из Хужира и 93 % песка из Ангасолки, что делает ее самой однородной по сравнению с другими.

Гранулометрический состав определяет ценность и сферу использования сырья. Для пищевой промышленности наиболее приемлемым будет среднефракционный песок из г. Байкальска.

Заключение

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Песок проб, отобранных в различных точках юго-западных прибрежных районов оз. Байкал, можно классифицировать преимущественно как озерный.

2. Кристаллохимический состав исследуемых нами песков достаточно разнообразен. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что в своем большинстве пески состоят из кристаллов кварца и полевого шпата,

⁵ Бетехтин А.Г. Курс минералогии: учеб. пособие. М.: КДУ, 2008. 543 с.



процент вторичных минералов минимален, что хорошо согласуется с литературными данными.

3. Данные гранулометрического состава, полученные ситовым анализом, свидетельствуют о том, что в основном пробы сыпучего материала достаточно однородные, в каждой пробе имеется

преобладающая фракция. Исключение представляет песок с побережья вблизи г. Слюдянки, для которого характерен большой разброс размеров частиц.

4. Для целей пищевой отрасли наиболее подходящим является песок г. Байкальска.

Библиографический список

1. Морозов Н.М., Боровских И.В., Галеев А.Ф. Влияние вида песка на свойства мелкозернистого бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 370–375.
2. Баженов Ю.М., Харченко А.М. Безусадочные мелкозернистые бетоны с использованием некондиционных песков // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 5. С. 86–88.
3. Kondratiev V.V., Karlina A.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Kleshnin A.A. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction // IOP Conference: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 042068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032068>
4. Kondratiev V.V., Karlina A.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Gorovoy V.O. Structure of enriched ultradisperse wastes of silicon production and concretes modified by them // IOP Conference: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 042064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042064>
5. Быкова Т.Ю. Кристаллохимические характеристики песков озера Байкал // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. Иркутск, 2019. С. 125–127.
6. Гусева Е.А., Шнырова А.А. Определение физических свойств песков озера Байкал // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета [Электронный ресурс]. 2019. Т. 9. № 3. С. 11–13. URL: <http://mvestnik.istu.irk.ru/journals/2019/03/articles/02> (29.04.2019).
7. Яковлева А.А., Гусева Е.А., До В.Т. Поглоительные свойства песков рекреационных зон юго-западного побережья Байкала по отношению к некоторым агентам // Биотехнология в интересах экологии и экономики Сибири и Дальнего Востока: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Улан-Удэ, 2018. С. 94–100.
8. Васильев Е.К., Нахмансон М.М. Качественный рентгенофазовый анализ. Новосибирск: Наука, 1986. 199 с.
9. Кристаллохимия и структурная минералогия: сб. стат. / отв. ред. В.А. Франк-Каменецкий. Л.: Наука, 1979. 132 с.
10. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.
11. Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S. The properties of concrete made with fine dune sand // Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. P. 1803–1808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>
12. Chen Y. Construction: limit China's sand mining // Nature. 2017. Vol. 550. P. 457. <https://doi.org/10.1038/550457c>
13. Gelabert P. Environmental effects of sand extraction practices in Puerto Rico // Managing beach resources in the smaller Caribbean Islands. Mayaguez, 1997. P. 63–68.
14. Bayram A., Önsöy H. Sand and gravel mining impact on the surface water quality: a case study from the city of Tirebolu (Giresun Province, NE Turkey) // Environmental Earth Science. 2015. Vol. 73. P. 1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3549-2>
15. Brunier G., Anthony E.J., Goichot M., Provansal M., Dussouillez P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: the marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilization // Geomorphology. 2014. Vol. 224. P. 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.009>
16. Khan S., Sugie A. Sand mining and its social impacts on local society in rural Bangladesh: a case study of a village in Tangail District // Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India. 2015. Vol. 2. No. 1. P. 1–11.
17. Гусева Е.А., Константинова М.В. Гранулометрический состав песка проб с юго-западного побережья Байкала // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета [Электронный ресурс]. 2019. Т. 9. № 2. С. 7–10. URL: <http://mvestnik.istu.irk.ru/journals/2019/02/articles/01> (29.04.2019).
18. Потемкина Т.Г., Потемкин В.Л., Гусева Е.А. Устьевые области рек озера Байкал // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 9 (92). С. 185–192.
19. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения. Л.: Недра, 1969. 248 с.



20. Фадеев П.И. К обоснованию номенклатуры, терминологии и систематизации песчаных образований // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 12–23.

21. Фадеев П.И. Вопросы терминологии и классификации песчаных пород // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения / ред. Г.С. Золотарев [и др.]. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 112–177.

22. Фадеев П.И. К вопросу о пространственной изменчивости гранулометрического состава песчаных пород // Вестник Московского университета. Геология. 1979. № 5. С. 53–59.

23. Иконин С.В., Леденев В.В. Исследование свойств песчаных грунтов // Исследование инженерно-геологических свойств грунтов для

целей строительства / науч. ред. В.Ф. Разоренов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1982. С. 28–37.

24. Смоляницкий Л.А., Курилович А.Э. Дискретная классификация песков. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990. 5 с.

25. Кононов Е.Е. О происхождении песчаных толщ Северного Прибайкалья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. № 4 (40). С. 23–27.

26. Тайсаев Т.Т. Эоловые процессы в Приольхонье и на о. Ольхон (Западное Забайкалье) // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 265. № 4. С. 948–951.

27. Выркин В.Б. Эоловое рельефообразование в Прибайкалье и Забайкалье // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 25–32.

References

1. Morozov NM, Borovskich IV, Galeev AF. The influence of sand on properties of fine-grained concrete. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2016;4:370–375. (In Russ.)

2. Bazhenov JuM, Kharchenko AI. Dimensional stability of fine-grained concrete with unconditioned sands. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* = Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2012;5:86–88. (In Russ.)

3. Kondratiev VV, Karlina AI, Guseva EA, Konstantinova MV, Kleshnin AA. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction. *IOP Conference: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies*. Series: Materials Science and Engineering. 2018;463:042068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032068>

4. Kondratiev VV, Karlina AI, Guseva EA, Konstantinova MV, Gorovoy VO. Structure of enriched ultradisperse wastes of silicon production and concretes modified by them. *IOP Conference: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies*. Series: Materials Science and Engineering. 2018;463:042064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042064>

5. Bykova TYu. Crystal-chemical characteristics of the sands of Lake Baikal. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh i mineral'nykh resursov: materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* = Prospects of the processing technology for hydrocarbon and mineral resources: Proceedings of the 9th All-Russian Scientific-and-practical Conference with International Participation. Irkutsk; 2019. p.125–127. (In Russ.)

6. Guseva EA, Shnyrova AA. Determination of physical properties of Lake Baikal sands. *Molodezhnyi vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = ISTU Bulletin of Youth. 2019;9(3):11–13. Available from:

<http://mvestnik.istu.irk.ru/journals/2019/03/articles/02> [Accessed 29th April 2019]. (In Russ.)

7. Yakovleva AA, Guseva EA, Do VT. The sands absorption properties of the recreational zones of the south-western coast of Lake Baikal in relation to some agent. In: *Biotehnologiya v interesakh ekologii i ekonomiki Sibiri i Dal'nego Vostoka: materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = Biotechnology for the benefit of ecology and economy of Siberia and The Far East of Russia: Proceedings of the 5th All-Russian Scientific-and-practical Conference. Ulan-Ude; 2018. p.94–100. (In Russ.)

8. Vasil'ev EK, Nakhmanson MM. *Qualitative X-ray phase analysis*. Novosibirsk: Nauka; 1986. 199 p. (In Russ.)

9. Frank-Kamenetskii VA. *Crystal chemistry and structural mineralogy*. Leningrad: Nauka; 1979. 132 p. (In Russ.)

10. Pettijohn F, Potter P, Siver R. *Sand and sandstone*. Moscow: Mir; 1976. 535 p. (In Russ.)

11. Al-Harthy AS, Abdel Halim M, Taha R, Al-Jabri KS. The properties of concrete made with fine dune sand. *Construction and Building Materials*. 2007;21:1803–1808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>

12. Chen Y. Construction: limit China's sand mining. *Nature*. 2017;550:457. <https://doi.org/10.1038/550457c>

13. Gelabert P. Environmental effects of sand extraction practices in Puerto Rico. In: *Managing beach resources in the smaller Caribbean Islands*. Mayaguez; 1997. p.63–68.

14. Bayram A, Önsoy H. Sand and gravel mining impact on the surface water quality: a case study from the city of Tirebolu (Giresun Province, NE Turkey). *Environmental Earth Science*. 2015;73:1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3549-2>

15. Brunier G, Anthony EJ, Goichot M, Provansal M, Dussouillez P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: the marked impact of river-bed mining and implications for delta



destabilization. *Geomorphology*. 2014;224:177–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.009>

16. Khan S, Sugie A. Sand mining and its social impacts on local society in rural Bangladesh: a case study of a village in Tangail District. *Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India*. 2015;2(1):1–11.

17. Guseva EA, Konstantinova MV. Particle size of sand samples from the south-western coast of Lake Baikal. *Molodezhnyi vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = ISTU Bulletin of Youth. 2019;9(2):7–10. Available from: <http://mvestnik.istu.irk.ru/journals/2019/02/articles/01> [Accessed 29th April 2019]. (In Russ.)

18. Potemkina TG, Potemkin VL, Guseva EA. Lake Baikal estuary areas. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2014;9:185–192. (In Russ.)

19. Shvanov VN. *Sand rocks and methods of their study*. Leningrad: Nedra; 1969. 248 p. (In Russ.)

20. Fadeev PI. On substantiation of the range, terminology and systematization of sand formations. *Inzhenernaya geologiya*. 1985;4:12–23. (In Russ.)

21. Fadeev PI. On terminology and classification of sand rocks. In: Zolotarev GS, et al. (eds.). *Voprosy inzhenernoi geologii i gruntovedeniya* = Engineering geology and soil studies. Iss. 3. Moscow:

Moscow State University; 1973. p.112–177. (In Russ.)

22. Fadeev PI. On spatial variability of sand rocks' granulometric composition. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya*. 1979;5:53–59. (In Russ.)

23. Ikonin SV, Ledenev VV. Investigation of sandy soil properties. In: Razorenov VF (eds.). *Issledovanie inzhenerno-geologicheskikh svoystv gruntov dlya tselei stroitel'stva* = Research of engineering-geological properties of soils for construction purposes. Voronezh: Voronezh State University; 1982. p.28–37. (In Russ.)

24. Smolyanitskii LA, Kurilovich AE. *Discrete classification of sands*. Voronezh: Voronezh State University; 1990. 5 p. (In Russ.)

25. Kononov EE. On the origin of sandy depths of the Northern Transbaikalia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2009;4:23–27. (In Russ.)

26. Taisaev TT. Atmogenic processes in the Olkhon area (West Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1982;265(4):948–951. (In Russ.)

27. Vyrkin VB. Atmogenic relief formation in Transbaikalia. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010;3:25–32. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Гусева Е.А., Константинова М.В. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Elena A. Guseva, Marina V. Konstantinova are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Гусева Елена Александровна,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов,
Институт авиамашиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: el.guseva@rambler.ru

Elena A. Guseva,

Cand. Sci. (Eng.), Docent,
Associate Professor, Department of Engineering Technologies and Materials,
Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: el.guseva@rambler.ru

**Константинова Марина Витальевна,**

кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов,
Институт авиамашиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: mavikonst@mail.ru

Marina V. Konstantinova,

Cand. Sci. (Chem.), Docent,
Associate Professor, Department of Engineering Technologies and Materials,
Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: mavikonst@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.244.443

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-77-87>

Обоснование типов промывочных жидкостей для первичного вскрытия терригенных коллекторов углеводородов (юг Сибирской платформы)

© И.Д. Ташкевич^а, А.Г. Вахромеев^б, С.А. Сверкунов^с

^{а-с}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^бИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^{б,с}ООО «РН-Бурение», иркутский филиал, г. Иркутск, Россия

Резюме: Первичное вскрытие продуктивного пласта является важной частью строительства скважины. При некачественном вскрытии существует вероятность закупоривания порового пространства коллектора, что может привести к низкому дебиту углеводородов со скважины или же к его отсутствию. При этом решение данной проблемы очень затратное, сложное, а возможно, поиск данного решения вообще не даст результатов. Такого рода ситуация может привести к экономическим и временным потерям. Авторами рассмотрены существующие типы промывочных жидкостей для первичного вскрытия. В процессе изучения выявлены их преимущества и недостатки, а также степень их влияния на породы-коллекторы. В связи с этим был произведен поиск решения для минимизации негативного влияния промывочных жидкостей на продуктивный пласт. На основе полученных данных предложен способ минимизации негативного влияния промывочных жидкостей на продуктивный пласт, способствующий снижению глубины проникновения фильтрата промывочных жидкостей в пласт, что позволит увеличить продуктивность и длительность разработки скважины.

Ключевые слова: первичное вскрытие, промывочные жидкости, хризотил-асбест

Информация о статье: Дата поступления 18 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 13 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Ташкевич И.Д., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А. Обоснование типов промывочных жидкостей для первичного вскрытия терригенных коллекторов углеводородов (юг Сибирской платформы). *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-77-87>

Validation of the flushing fluid types used in penetrating terrigenous hydrocarbon reservoirs (Siberian platform south)

© Ivan D. Tashkevich^a, Andrey G. Vakhromeev^b, Sergey A. Sverkunov^c

^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^bInstitute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

^{b,c}LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch, Irkutsk, Russia

Abstract: Penetrating a reservoir is an important part of well construction. Non-quality penetration may cause clogging of the reservoir's pore space, which in turn may lead to a low hydrocarbon debit or its absence. Searching for a solution to this problem is costly and complicated, and may eventually turn unsuccessful, leading to loss of time and money. The authors have examined the existing types of flushing fluids used in penetrating the reservoirs. The advantages and disadvantages of the fluids, as well as the degree of their influence on the reservoir rocks have been defined. Based on the data obtained, the authors have proposed a method for minimizing the negative impact of the flushing fluids on the reservoir. The method allows reducing the depth of the flushing fluid filtrate penetration in the reservoir, which increases the deliverability and life of the well.

Keywords: reservoir penetration, flushing fluids, chrysotile asbestos

Information about the article: Received December 18, 2019; accepted for publication February 13, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Tashkevich ID, Vakhromeev AG, Sverkunov SA. Validation of the flushing fluid types used in penetrating terrigenous hydrocarbon reservoirs (Siberian platform south). *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):77–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-77-87>



Введение

Продуктивность и длительность разработки скважины определяется в процессе строительства, наибольшее влияние на эти факторы оказывает качество первичного вскрытия продуктивного пласта.

Во время вскрытия в пласт начинает проникать фильтрат промывочной жидкости, далее это происходит во время капитального ремонта скважины, ее испытания и освоения до того момента, пока скважина не будет введена в эксплуатацию. За это время проникновение фильтратов буровых и тампонажных растворов в продуктивный пласт продолжается, что часто способствует снижению его первоначальных свойств по проницаемости. Эти проблемы особенно актуальны для горизонтальных стволов с большой протяженностью и многоствольных скважин, в которых затрачивается гораздо больше времени от начала вскрытия продуктивного пласта и ввода скважины в эксплуатацию, чем в вертикальных и наклонно-направленных скважинах.

Материалы и методы исследования

Породы-коллекторы на месторождениях нефти и газа Восточной Сибири по своему вещественному составу цементирующего материала делятся на три разновидности:

- песчаники серые, темно-серые, преимущественно кварцевые;
- песчаники слабо- и среднепроницаемые, засоленные каменной солью;
- глинистые песчаники [1].

Данная классификация позволяет выбрать оптимальный состав дисперсионной среды и дисперсной фазы промывочной жидкости, используемой для вскрытия терригенных отложений, в каждой из вышеперечисленных зон [2].

Для достижения наилучшего результата при вскрытии продуктивного

пласта необходимо соблюдать следующие требования к составу и свойствам промывочной жидкости:

– состав промывочной жидкости необходимо подобрать так, чтобы ее фильтрат был инертен к породам, из которых состоит продуктивный горизонт, то есть при контакте с пластом он не способствовал набуханию глинистых частиц, увеличению гидрофильности пород и увеличению связанной воды в порах;

– фильтрат промывочной жидкости по составу должен быть идентичен флюиду, заполняющему пласт, чтобы при их контакте не образовывались нерастворимые осадки;

– в промывочной жидкости нужно поддерживать необходимую концентрацию твердой фазы, которая может создавать непроницаемую фильтрационную корку, препятствующую глубокому проникновению фильтрата в пласт;

– концентрация и тип соли в составе фильтрата должны соответствовать концентрации и типу соли в пластовой воде;

– фильтрат промывочной жидкости, применяемой для вскрытия нефтяных пластов, должен снижать поверхностное натяжение на границе фильтрата и нефти;

– необходимо поддерживать минимальную фильтратоотдачу промывочной жидкости в пластовых условиях;

– плотность должна быть подобрана таким образом, чтобы дифференциальное давление было ближе к нулю или в случае бурения на депрессии меньше нуля¹ [3, 4].

Для первичного вскрытия продуктивных горизонтов (как карбонатных, так и терригенных коллекторов) применяются буровые растворы с различной дисперсионной средой, основными из которых являются водные, водно-спиртовые, углеводородные и синтетические² [5].

¹ Юшков И.Р., Хижняк Г.П., Илюшин П.Ю. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений: учеб.-метод. пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. 177 с.

² Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.



На рис. 1 приведена классификация буровых растворов, в которой учитываются вид и состав дисперсионной среды и дисперсной фазы [6].

Тип промывочной жидкости, ее компонентный состав и границы возможного применения необходимо выбирать, опираясь на геолого-технические условия, а именно: физико-химические свойства пород коллектора и насыщающие их флюиды, значения горного и пластового давления, забойной температуры и т. д.

Исходя из этого, промывочные жидкости для первичного вскрытия продуктивных горизонтов должны:

– оказывать наименьшее негативное влияние на проницаемость коллектора;

– быть инертными к породам коллектора и не допускать набухания глинистых частиц [5–7].

Результаты исследования и их анализ

Даже если промывочная жидкость выбрана правильно, она все равно будет

оказывать негативное влияние на продуктивный пласт в той или иной степени, поэтому при рассмотрении вариантов необходимо учесть все плюсы и минусы типов растворов.

В общем виде их можно подразделить на три типа:

1) растворы на водной основе (РВО);

2) растворы на углеводородной основе (РУО) (обратные эмульсии, прямые эмульсии);

3) газообразные или азрированные растворы.

Растворы на водной основе. РВО, в частности для вскрытия продуктивных горизонтов, представляют собой полимерные соленащенные растворы. Основой их является пресная вода, которая в дальнейшем обрабатывается солью (NaCl, KCl, CaCl₂ и т. д.) и различными полимерами. Концентрация и тип твердой фазы здесь выбираются таким образом, чтобы при дальнейшем освоении ее можно было растворить кислотой

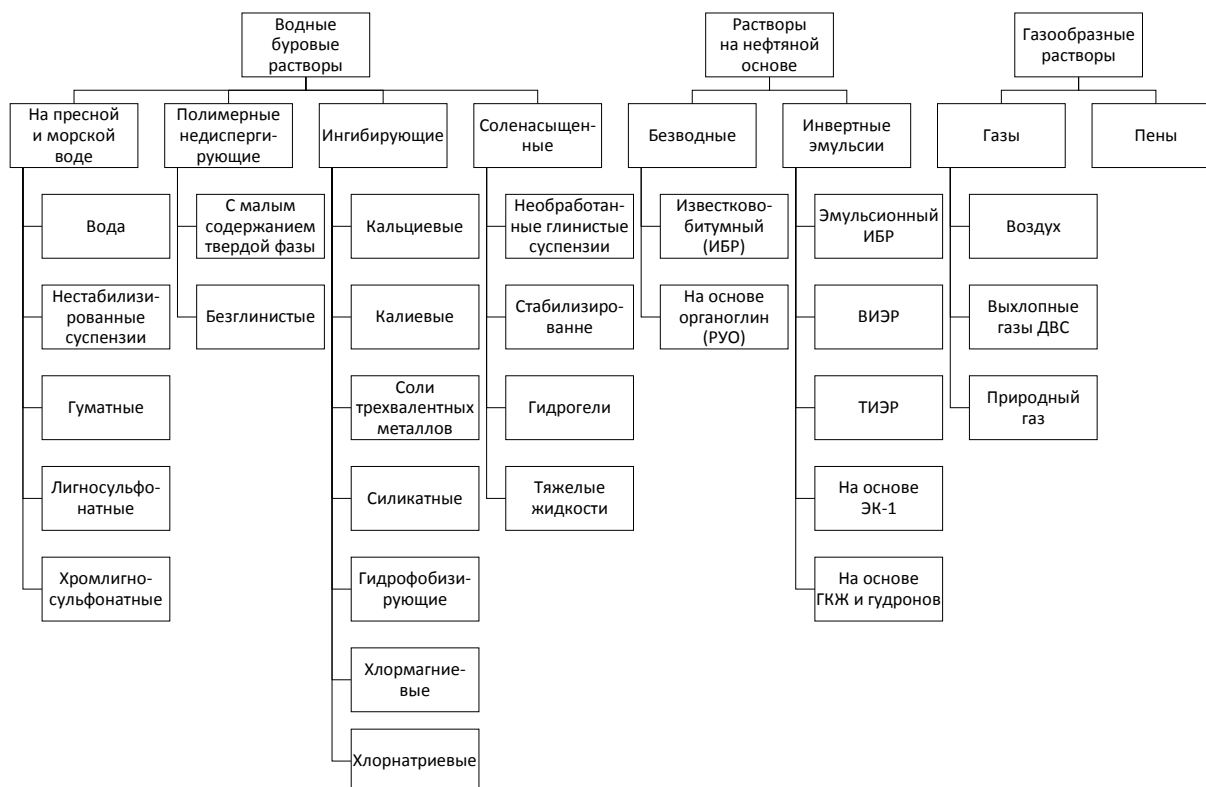


Рис. 1. Классификация буровых растворов
Fig. 1. Classification of drilling fluids



или щелочью, наиболее распространенным типом твердой фазы является мраморная крошка³ [7].

Данные растворы привлекательны своей относительно невысокой стоимостью и простотой приготовления. В связи с этим можно выделить ряд преимуществ РВО:

- широкие пределы регулирования плотности раствора (в данном случае плотность можно регулировать, изменяя концентрацию соли или содержание твердой фазы);

- хорошая очистка ствола скважины и минимальная эквивалентная циркуляционная плотность, обеспечиваемые реологией системы (для создания реологических параметров используется ксантановая смола, которая повышает значение вязкости при низких скоростях сдвига, что улучшает качество очистки горизонтального ствола, а также повышает изначально низкое значение эквивалентной циркуляционной плотности);

- низкий коэффициент трения (смазывающая добавка используется в концентрациях от 1 до 4 %, смазка снижает коэффициент трения, а также в некоторой степени уменьшает фильтрацию);

- низкая водоотдача и быстрое образование тонкой низкопроницаемой фильтрационной корки (разнофракционный состав мела в буровом растворе, а также наличие полимеров обеспечивают низкую водоотдачу, образуя тонкую непроницаемую корку);

- сохранение характеристик пласта, высокая степень восстановления проницаемости, низкий скин-фактор;

- экологическая и пожарная безопасность (по сравнению с РУО раствор наиболее экологичен и абсолютно не пожароопасен);

- простота приготовления и управления свойствами раствора в полевых условиях (рецептура раствора довольно проста, что позволяет за короткий срок

приготовить необходимый объем бурового раствора).

Помимо всех преимуществ у данного типа промывочной жидкости также есть и свои недостатки:

- сгустки полимеров (при несоблюдении правил приготовления раствора, например времени ввода полимеров, в растворе образуются сгустки полимеров, которые могут закупорить телесистему или же в дальнейшем отбиться на ситах, что приведет к снижению реологических и фильтрационных свойств раствора);

- концентрация CaCO_3 (в полевых условиях трудно обеспечить необходимую концентрацию мела в растворе, так как раствор нарабатывается мельчайшей твердой фазой, которую не сможет отбить применяемое очистное оборудование, следовательно, приходится разбавлять раствор свежеприготовленным без содержания в нем мела);

- несоответствие химических реагентов (в полевых условиях не соблюдается правильная рецептура раствора, в большинстве случаев используются аналоги химических реагентов);

- разложение раствора (в процессе использования и хранения раствора происходит разрушение полимеров бактериями, что приводит к его непригодности);

- недостаточная смазывающая способность (полимерный раствор не способен обеспечить высокую смазывающую способность, как, например, РУО);

- фильтрация воды из раствора (как уже говорилось ранее, в процессе вскрытия пласта и дальнейших работ происходит проникновение фильтрата в пласт, что может привести к набуханию пород коллектора и образованию нерастворимых осадков в порах).

Растворы на углеводородной основе. Использование РУО позволяет снизить скин-эффект продуктивных коллекторов, поскольку несущей средой этих растворов является жидкость, по свойствам однородная флюиду, насыщающему

³ Baroid drilling fluids. Water Base Mud & Completion Fluids Seminar. Raleigh: Career development center, 1991.



продуктивный пласт, и, следовательно, не образующая при их взаимодействии малоподвижных смесей, блокирующих поровое пространство пласта⁴ [8, 9].

РУО бывают двух типов: обратная эмульсия и прямая эмульсия.

Основой обратных эмульсий служат различные углеводороды и их продукты: нефть, дизель, синтетические масла и т. д. В качестве дисперсной фазы используются рассолы.

Преимуществами обратных эмульсий являются:

- высокая устойчивость к загрязнению (в отличие от РВО обратные эмульсии наиболее устойчивы к различным типам загрязнений – это обеспечивает стабильность их параметров, притом не требуется часто обрабатывать растворы химией для их поддержания);

- высокая смазывающая способность (ввиду большого содержания углеводородной основы в обратных эмульсиях от 60 до 90 % они обладают высокой смазывающей способностью – это обеспечивает низкое значение крутящего момента, что особенно важно при бурении протяженных горизонтальных стволов);

- многоразовое применение и долговечное хранение (в отличие от РВО обратные эмульсии не разлагаются и не замерзают при низких температурах, что позволяет без проблем транспортировать и хранить их);

- отсутствие водоотдачи (в качестве дисперсионной среды выступает углеводород, а в качестве дисперсной фазы – вода, поэтому фильтрат обратных эмульсий представляет собой основу без содержания в ней воды);

- инертность к породам коллектора (низкое содержание воды в растворе обеспечивает наименьшее негативное влияние на проницаемость пород коллектора, так как отсутствуют какие-либо физико-химические взаимодействия между пластом и промывочной жидкостью);

- низкая плотность (за счет использования углеводородов с низкой плотностью обратные эмульсии позволяют вскрывать продуктивные пласты при аномально низких пластовых давлениях).

Среди недостатков данных растворов можно выделить следующее:

- высокая стоимость 1 м³ раствора (из-за высокого содержания дорогостоящего углеводорода и дорогих компонентов стоимость кубометра раствора может достигать ста тысяч рублей, что может быть крайне критично при наличии поглощения);

- пожароопасность (обратные эмульсии крайне пожароопасны, что вызывает необходимость использования взрывозащищенного оборудования и специальных приспособлений для оперативного тушения пожаров);

- экологическая опасность (по своему составу обратные эмульсии очень вредны как для человека, так и для окружающей среды, и в некоторых случаях их применение может быть ограничено по экологическим соображениям);

- «боязнь» воды (вода для обратной эмульсии является загрязнителем, так как при попадании в нее воды сильно изменяются реологические параметры и нарушается стабильность эмульсии, что в свою очередь влечет последующую обработку дорогостоящей основой и химическими реагентами; поэтому необходимо изолировать данный тип промывочной жидкости от любых источников воды);

- возможность образования эмульсий с флюидом пласта (при образовании такой эмульсии может происходить блокада порового пространства, что приведет к снижению продуктивности пласта);

- способность менять характер смачиваемости пласта (в состав обратных эмульсий входят смачивающие агенты, которые могут вступать в реакцию с породами продуктивного пласта и менять характер смачиваемости пласта,

⁴ Курбанов Х.Н. Исследование и разработка биополимерных растворов для повышения эффективности первичного вскрытия продуктивных пластов: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15. СПб., 2016. 129 с.



например, с гидрофильного на гидрофобный, что в дальнейшем осложняет либо делает невозможной добычу углеводородов из пласта).

В прямых эмульсиях в качестве основы используется вода или рассолы, а в качестве дисперсной фазы – углеводород. Эти растворы являются чем-то средним между обратными эмульсиями и РВО, поэтому они имеют схожие преимущества и недостатки. Благодаря низкому содержанию в них углеводорода они имеют относительно низкую стоимость и не так экологически и пожароопасны, как обратные эмульсии. Так как в качестве дисперсионной среды применяется вода, то для поддержания реологии и водоотдачи используются полимеры, такие как ксантановая смола и модифицированный крахмал.

Можно выделить следующие преимущества прямых эмульсий:

- относительно низкая стоимость (низкая стоимость обосновывается низким содержанием дорогостоящих углеводородов);

- возможность долгосрочного хранения (тем не менее такие растворы не будут храниться так долго, как прямая эмульсия, потому что в их составе присутствуют полимеры, которые подвергаются разложению);

- высокая смазывающая способность (содержание углеводорода в них варьирует от 20 до 40 %, что позволяет обеспечивать высокую смазывающую способность);

- достаточно хороший вынос выбуренной породы (за счет применения полимеров обеспечиваются достаточные реологические параметры для выноса шлама).

Недостатки прямых эмульсий:

- разложение раствора (как бы то ни было, в составе прямых эмульсий присутствуют полимеры, которые подвергаются разложению);

- рост реологических параметров при нагревании (при повышении температуры происходит рост реологических

параметров, что может быть критично при высоких забойных температурах);

- экологическая опасность (данные растворы все же экологически опасны для человека и окружающей среды из-за высокого содержания в них углеводорода);

- фильтрация воды из раствора (фильтрат раствора представляет собой воду и углеводород, которые при отстаивании отделяются друг от друга; большое количество воды может оказать негативное влияние на продуктивность пласта).

Аэрированные растворы. Данный тип растворов применяется при вскрытии пластов с аномально низким пластовым давлением на равновесии или депрессии. Аэрация достигается введением в промывочный раствор газа (воздух, азот, газы двигателя внутреннего сгорания). При этом используются компрессоры, инжекторы и аэратор, что подразумевает затраты на закупку дополнительного оборудования. Также аэрация достигается химическим способом, то есть вводом в раствор сульфанола, который обеспечивает вспенивание раствора при его интенсивном перемешивании.

Можно выделить следующие преимущества использования аэрированных растворов:

- возможность предотвращения и ликвидации поглощений (у таких растворов низкая плотность, следовательно, они создают низкое гидростатическое давление, что в свою очередь способствует снижению интенсивности поглощения или его ликвидации);

- относительно высокая скорость проходки (повышение показателей работы долота благодаря низкому угнетающему давлению);

- высокое качество вскрытия пласта (достигается за счет уменьшения гидростатического давления и применения поверхностно-активных веществ).

К недостаткам аэрированных промывочных растворов относятся:

- высокая коррозия (необходимо применять ингибиторы коррозии при



аэрации воздухом для уменьшения коррозии бурильной и обсадной колонн, устьевого оборудования);

– установка дополнительных подпорных насосов (при содержании в растворе более 10 % газа насосы начинают всасывать воздух, что может нарушить работоспособность буровых);

– необходимость применения дополнительного оборудования (как говорилось ранее, для аэрации растворов необходимо дополнительное оборудование, в частности компрессоры высокого давления и пеногенераторы).

Обсуждение результатов

Основными проблемами при первичном вскрытии пластов-коллекторов являются образования неразрушаемой фильтрационной корки, а также проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт, что влечет за собой образование физико-химических реакций между

пластовым флюидом и самим фильтратом. Поэтому в качестве оптимального наполнителя для промывочных жидкостей предлагается использовать хризотил-асбест, который способен значительно снизить фильтрационные свойства раствора за счет волокнистого строения (рис. 2) [10, 11].

В отличие от частиц карбоната кальция (рис. 3) хризотил-асбест не будет проникать в поровые каналы коллекторов, а будет накапливаться на стенке скважины, создавая практически непроницаемую фильтрационную корку, которая может быть удалена кислотным составом, и при этом проницаемость продуктивного пласта полностью восстановится. Такая корка защитит коллектор от загрязнения выбуренной породой и полимерами, содержащимися в составе промывочной жидкости [12].

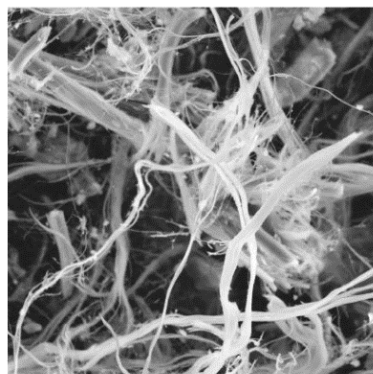
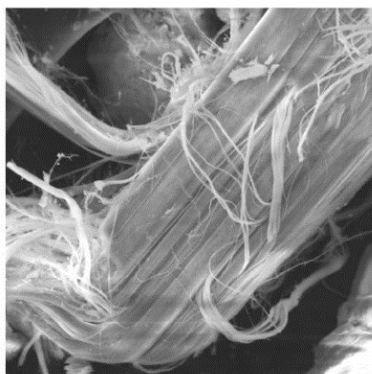


Рис. 2. Волокна хризотил-асбеста под микроскопом
Fig. 2. Chrysotile asbestos fibers under the microscope

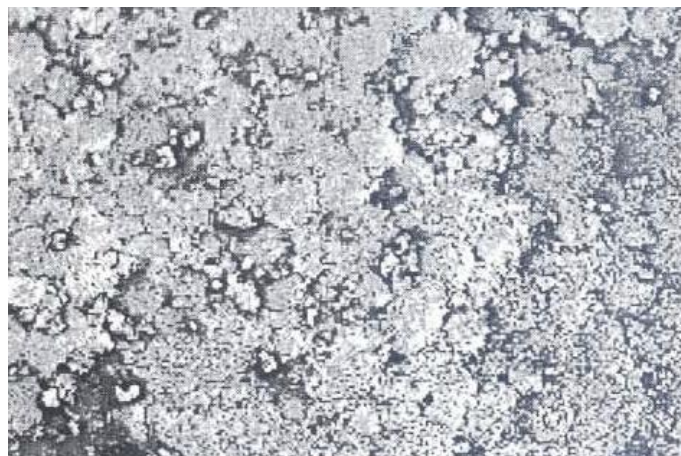


Рис. 3. Фильтрационная корка карбоната кальция под микроскопом
Fig. 3. Calcium carbonate filter cake under the microscope



Асбестовый наполнитель может использоваться как для водоорганических, так и для полимерных соленасыщенных растворов. Такие растворы могут применяться для вскрытия практически любых типов пород-коллекторов [13].

Преимуществами данных систем растворов являются:

- низкие фильтрационные свойства (за счет хризотил-асбеста создается экран, не позволяющий фильтрату проникать глубоко в продуктивный пласт);

- растворимость их кислотой (фильтрационная корка, образованная асбестом, может быть разрушена слабым раствором кислоты, при этом не снижается продуктивность пласта);

- широкая область применения (благодаря различным составам промысловых жидкостей они могут применяться для многих типов пород-коллекторов, таких как преимущественно кварцевые песчаники, песчаники, засоленные каменной солью, и глинистые песчаники);

- низкий расходный показатель (асбест имеет расходный показатель в 15 раз ниже, чем у карбоната кальция) [5].

Недостатки данных систем:

- возможность наматывания волокон асбеста на бурильный инструмент (при неправильном вводе асбеста его волокна будут представлять собой длинные нити, поэтому при промывке ствола с использованием роторного способа бурения может происходить наматывание нитей асбеста на бурильный инструмент);

- канцерогенный фактор.

Канцерогенный фактор – очень существенный недостаток. Асбест является высокоопасным канцерогеном, поэтому в целях безопасности при работе с ним необходимо соблюдать ряд требований. Это в первую очередь использование необходимых средств индивидуальной защиты органов дыхания, причем на рабочем месте должен находиться достаточный и уместный запас респираторного оборудования. Использованный

рабочими респиратор должен сниматься только после очистки от пыли. Кроме того, необходимо использовать специальную защитную одежду, которая должна полностью закрывать всю рабочую одежду, чтобы после снятия защитной спецодежды на одежде рабочего не оставалось асбестовой пыли. В случае многократного использования одежды необходимо выделение отдельных раздевалок для того, чтобы загрязненная одежда хранилась отдельно от личной. Также должен выдаваться соответствующий защитный головной убор. Все машины, агрегаты и оборудование, внешние поверхности оборудования вытяжной вентиляции и внутренние поверхности здания должны быть свободны от пыли⁵. В связи с этим применение асбеста на производстве стараются ограничить. Однако при правильном его использовании можно снизить его негативное влияние. Например, для промысловых жидкостей можно использовать водорастворимые мешки и помещать их прямо в емкость с перемешивателями, что позволит полностью исключить контакт вещества с организмом человека. Данные мешки растворяются при температуре от 0 до 75 °C

Заключение

На основе всего вышеизложенного можно сказать, что пока не существует идеальной промысловой жидкости для первичного вскрытия: каждый тип по своему оказывает отрицательное влияние на продуктивность пласта, а также негативное влияние на человека и окружающую среду.

Для снижения отрицательного эффекта промысловых жидкостей необходимо рассмотреть пути совершенствования их применения. Так, например, для РВО можно использовать химические реагенты высокого качества с целью создания наилучших реологических и фильтрационных параметров, что позволит уменьшить глубину проникновения

⁵ Безопасность труда при работе с асбестом: инструкция Международной Организации Труда. Женева: Международная Организация Труда, 1984. 115 с.



фильтрата в пласт. Для РУО, которые являются экологически опасными, можно рассмотреть использование установок для осушки и переработки шлама, а также применение автоматических пожарных средств с целью своевременного устранения возгорания раствора.

Ко всему прочему, для достижения наилучшего результата от первичного вскрытия необходимо учитывать уникальность свойств каждого из представленных типов пород-коллекторов.

В горно-геологических условиях юга Сибирской платформы во всех вышеперечисленных типах буровых растворов для первичного вскрытия можно рассмотреть применение асбестового наполнителя в качестве дисперсной фазы для создания непроницаемой легко разрушаемой фильтрационной корки. В данном случае применение хризотил-асбеста

является более эффективным, чем применение мела в качестве реагента для контроля фильтрации. Это связано с наличием в составе хризотил-асбеста волокон, которые образуют более плотную и тонкую фильтрационную корку на стенках скважины. При этом можно использовать различные системы и составы промывочных жидкостей. Так, например, для вскрытия кварцевых и засоленных песчаников рекомендуется использование соленасыщенных полимерных растворов, а также растворов на водноорганической основе. Для вскрытия глинистых песчаников же наилучшим решением будет использование растворов с применением ингибиторов глин, таких как лигнин или хлорид калия. Применение хризотил-асбеста с целью контроля фильтрации рекомендуется для всех трех типов терригенных пород-коллекторов.

Библиографический список

1. Богданов В.С., Брагина О.А. Особенности технологии вскрытия продуктивных отложений и заканчивания нефтяных и газовых скважин на месторождениях Восточной Сибири // Геология и полезные ископаемые Юга Восточной Сибири: сб. науч. тр. Вып. 3. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. С. 99–108.
2. Ахметзянов Р.Р., Жернаков В.Н. Совершенствование рецептуры бурового раствора для первичного вскрытия терригенных отложений Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2017. № 8. С. 80–82. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-8-80-82>
3. Овчинников В.П., Яковлев И.Г., Курбанов Г.Я. К методу оценки эффективности применения буровых растворов для вскрытия продуктивных пластов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2014. № 9. С. 40–44.
4. Пат. № 2669643, Российская Федерация, МПК С 09 К 8/00. Способ определения ингибирующих свойств бурового раствора / А.М. Гайдаров, А.А. Хуббатов. Заявл. 10.04.2017; опубл. 12.10.2018. Бюл. № 21.
5. Курбанов Х.Н. Буровые растворы для сохранения фильтрационно-емкостных свойств коллектора при первичном вскрытии пласта // Инженер-нефтяник. 2016. № 3. С. 18–22.
6. Следков В.В., Ионенко А.В., Гаджиев С.Г., Липатников А.А., Леонов Е.Г. Оценка эффективности буровых растворов для вскрытия продуктивного пласта // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2015. № 3. С. 7–14.
7. Крецул В.В. Влияние твердой фазы на фильтрационные характеристики промывочных жидкостей для первичного вскрытия // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2006. № 10. С. 32–36.
8. Нуцкова М.В., Сидоров Д.А., Тсикплону Д.Э., Сергеев Г.М., Васильев Н.И. Исследования буровых растворов на углеводородной основе для первичного вскрытия продуктивных пластов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19. № 2. С. 138–149.
9. Hudson J.E., Coffey M.D., Saner C.W., Teot A.S. Fluid-loss control through the use of a liquid-thickened completion and workover-brine // Journal of Petroleum Technology. 1983. Vol. 35. Iss. 10. <https://doi.org/10.2118/10652-PA>
10. Ишбаев Г.Г., Дильмиев М.Р., Христенко А.В., Милейко А.А. Теории подбора фракционного состава кольматанта // Бурение и нефть. 2011. № 6. С. 16–18.
11. Пат. № 2255104, Российская Федерация, МПК С 09 К 7/02. Буровой раствор и способ его получения / О.А. Брагина, В.С. Богданов, А.Г. Вахромеев, Г.И. Данченко, П.Н. Фонин, С.А. Щербин. Заявл. 26.02.2002; опубл. 28.06.2005. Бюл. № 11.
12. Матяш С.А., Карпов В.Ф., Ведерникова Я.А. Эффективность первичного вскрытия продуктивных пластов на различных системах буровых растворов // Технические системы и технологические процессы: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вып. 20. Уфа, 2018. С. 62–64.



13. Ибраев С.А., Отаров Е.Ж., Зейниденов А.К. Некоторые данные по физико-химическим свойствам поверхности хризотил-асбестового

волокна // Вестник Карагандинского университета. 1996. № 1. С. 3–7.

References

1. Bogdanov VS, Bragina OA. Specifics of the technology for opening productive deposits and completing oil and gas wells in the fields of Eastern Siberia. In: *Geologiya i poleznye iskopaemye Yuga Vostochnoi Sibiri* = Geology and Minerals of the Eastern Siberia South. Iss. 3. Irkutsk: Irkutsk State University; 2014. p.99–108. (In Russ.)
2. Akmetzyanov RR, Zhernakov VN. Improving the drilling fluid composition for drilling-in terrigenous deposits of Eastern Siberia. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2017;8:80–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-8-80-82>
3. Ovchinnikov VP, Yakovlev IG, Kurbanov GYa. Some method developed for assessing the effectiveness of drilling fluids used for opening of producing formation. *Stroitel'stvo neftnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2014;9:40–44. (In Russ.)
4. Gaidarov AM, Khubbatov AA. A method for determining the inhibitory properties of the drilling mud. Patent RF, no. 2669643; 2018. (In Russ.)
5. Kurbanov KhN. Drilling fluids to preserve the permeability and porosity of the collector in primary opening of the reservoir. *Inzhener-neftyanik*. 2016;3:18–22. (In Russ.)
6. Sledkov VV, Ionenko AV, Gadzhiev SG, Lipatnikov AA, Leonov EG. Assessment of completion drilling fluid performance. *Vestnik Assotsiatsii burykh podryadchikov* = Bulletin of the Association of Drilling Contractors. 2015;3:7–14. (In Russ.)
7. Kretsul VV. The effect of the solid phase on the filtration characteristics of the flushing fluids used in penetrating the reservoir. *Stroitel'stvo neftnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2006;10:32–36. (In Russ.)
8. Nutsikova MV, Sidorov DA, Tsikplonu DE, Sergeev GM, Vasil'ev NI. Investigations of oil based muds to primary opening of productive formations. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekh-nicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo* = Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2019;19(2):138–149. (In Russ.)
9. Hudson JE, Coffey MD, Saner CW, Teot AS. Fluid-loss control through the use of a liquid-thickened completion and workover-brine. *Journal of Petroleum Technology*. 1983;35(10). <https://doi.org/10.2118/10652-PA>
10. Ishbaev GG, Dil'miev MR, Khristenko AV, Mileiko AA. Bridging theories of particle size distribution. *Burenie i nef't*. 2011;6:16–18. (In Russ.)
11. Bragina OA, Bogdanov VS, Vakhromeev AG, Danchenko GI, Fonin PN, Shcherbin SA. *Drilling mud and a method for its production*. Patent RF, no. 2255104; 2005. (In Russ.)
12. Matyash SA, Karpov VF, Vedernikova YaA. Effectiveness of the reservoir penetration for different systems of drilling muds. In: *Tekhnicheskie sistemy i tekhnologicheskie protsessy: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = Technical Systems and Technological Processes: Proceedings of the International scientific and practical conference. Iss. 20. Ufa; 2018. p.62–64. (In Russ.)
13. Ibraev SA, Otarov EZh, Zeinidenov AK. Data on the physical and chemical properties of the chrysotile asbestos fiber surface. *Vestnik Karagandinskogo universiteta* = Bulletin of the Karaganda university. 1996;1:3–7. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Ташкевич И.Д., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Ivan D. Tashkevich, Andrey G. Vakhromeev, Sergey A. Sverkunov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

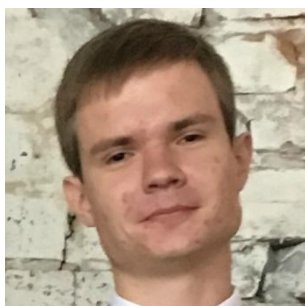
The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.



Сведения об авторах / Information about the authors



Ташкевич Иван Дмитриевич,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: vantash@mail.ru
Ivan D. Tashkevich,
Postgraduate Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: vantash@mail.ru



Вахромеев Андрей Гелиевич,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
зав. лабораторией геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
начальник геологического отдела,
ООО «РН-Бурение», иркутский филиал,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257, Россия,
e-mail: andrey_igp@mail.ru
Andrey G. Vakhromeev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Professor, Department of Oil and Gas Production,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Head of the Laboratory of Oil and Gas Geology,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
Chief of the Geology Department,
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,
257 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: andrey_igp@mail.ru



Сверкунов Сергей Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
главный технолог районной инженерно-технологической службы,
ООО «РН-Бурение», иркутский филиал,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257, Россия,
e-mail: dobro_75@mail.ru
Sergey A. Sverkunov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Department of Oil and Gas Production,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Chief Technologist, Regional Engineering and Technological Service,
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,
257 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: dobro_75@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.24.05:519

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-88-95>

Математическое программирование в задачах оптимизации процессов бурения скважин

© А.И. Ламбин^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Оптимизационные задачи, решаемые средствами линейного программирования, представляются в виде равенств или неравенств, а функция цели линейна. Методы линейного программирования широко распространены при решении задач техники, пищевой отрасли, химической индустрии. Эта распространенность объясняется доступностью математического обеспечения для решения задач линейного программирования большой размерности и возможностью их анализа при вариации исходных данных. Построение модели линейного программирования включает такие части, как определение переменных задачи, составление ограничений в виде неравенств и представление цели решения в виде линейной функции. В статье дано описание математической постановки задачи и представлена конкретная реализация этого описания на примере так называемых смесевых задач. В данном случае смесью является буровой раствор, технологическое качество которого зависит от входящих в него ингредиентов, стоимость его приготовления должна быть минимальной. Построение модели задачи осуществлялось путем решения ее графоаналитическим методом с привлечением программного кода построения графиков и специального кода решения задач линейного программирования среды MATLAB. Произведен анализ решения задачи, рассмотрены пути улучшения решения путем реорганизации состава смеси.

Ключевые слова: ограничения, функция цели, модель задачи, область допустимых решений

Информация о статье: Дата поступления 11 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 05 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Ламбин А.И. Математическое программирование в задачах оптимизации процессов бурения скважин. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 88–95. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-88-95>

Mathematical programming for process optimization problems in well drilling

© Anatoly I. Lambin^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Optimization problems solved by means of linear programming are presented in the form of equalities or inequalities, the target function being linear. Linear programming methods are widely used in solving problems for engineering, food industry, and chemical industry. This prevalence is due to the availability of the software for solving high-dimensionality linear programming problems and the possibility to analyze the problems when varying the source data. Constructing a linear programming model includes determining the variables of the problem, setting constraints in the form of inequalities, and representing the solution objective as a linear function. The article presents the description of the problem's mathematical formulation and the specific realization of the description for the so-called 'mixture' problems: the mixture is the drilling mud, its technological quality being a function of the ingredients, and the preparation cost should be minimal. The construction of the problem model is realized by solving it with the semigraphical method using a program code for graphing and a special code for solving linear programming problems in the MATLAB environment. The problem solution is analyzed, and the ways to improve the solution by reorganizing the mixture composition are suggested.

Keywords: constraints, target function, problem model, feasible region

Information about the article: Received December 11, 2019; accepted for publication February 05, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Lambin AI. Mathematical programming for process optimization problems in well drilling. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):88–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-88-95>



Введение

Большинство исследователей, занимаясь изучением экстремальных задач и разработкой методов их решения, привлекают такую математическую дисциплину, как математическое программирование, а в наиболее простых случаях его раздел – линейное программирование [1].

Методы линейного программирования позволяют решать задачи оптимизации технологии производственных процессов. Линейное программирование – общепринятый термин от неточного перевода с английского «линейное планирование». В настоящее время аппарат линейного программирования хорошо разработан и широко освещен в литературе¹ [2, 3].

Известные методы этого аппарата все-таки достаточно сложны и трудоемки. Математически он основывается на таких предпосылках, как детерминированность (параметры модели могут быть оценены или известны точно), пропорциональность (эффекты влияния переменных пропорциональны их значениям), аддитивность (эффект влияния переменных задачи равен сумме эффектов каждой переменной). Вычислительные возможности компьютеров в этом плане позволяют упростить решение задач линейного программирования [4, 5].

Несмотря на распространенность линейного программирования при решении задач техники, пищевой отрасли, химической индустрии в области бурения скважин наблюдается отсутствие решения задач оптимизации методами линейного программирования. Целью данной статьи является общее описание постановки такого рода задач, конкретная реализация этого описания на примере так называемых смесевых задач.

Одной из распространенных технологических задач оптимизации является задача составления оптимальной смеси,

которая применяется в таких областях, как производство минеральных удобрений, нефтепереработка, составление оптимальных рационов и диет. Композиции, составленные из материалов, должны обладать определенными свойствами и минимальной себестоимостью.

Трудно переоценить важность задач оптимизации, решение которых реализуется путем математического моделирования, то есть через формальное описание на математическом языке [6]. Математическая формулировка модели может быть достаточно сложной. Однако при первом приближении достаточно модели с линейными зависимостями между переменными, отображающими состояние реального объекта [7]. При таком приближении можно использовать методу линейного программирования, в которой линейная функция экстремума определяется на множестве также линейных ограничений в виде неравенств или равенств. Это множество ограничений в виде неравенств и равенств формирует выпуклое множество, которое отображается в выпуклый многогранник, в одной из его вершин и находится экстремум.

При математической постановке задач линейного программирования выделяют целевую функцию [8, 9] $f = c_1x_1 + \dots + c_nx_n$, экстремум которой требуется определить при наличии ограничений в виде равенств или неравенств:

$$a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m.$$

В матричной форме эти условия запишутся в следующей форме²:

$$c^T X \rightarrow \text{extr}, AX \leq b.$$

Здесь A – матрица размера $m \times n$; b , c – вектор-столбцы.

При малом числе переменных задача решается графо-аналитически³. Для этого в прямоугольных координатах X , Y выстраиваются прямые, соответствующие каждому ограничению, сочетание которых образует так называемую

¹ Ашманов С.А. Линейное программирование: учеб. пособие. М.: Наука, 1981. 340 с.

² Карпелевич Ф.И., Садовский Л.Е. Элементы линейной алгебры и линейного программирования: учеб. пособие. М.: Физматгиз, 1963. 276 с.

³ Лунгу К.Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2005. 128 с.



область допустимых решений в виде многоугольника. Градиент целевой функции определяет направление поиска вершины многоугольника, в которой находится экстремум целевой функции. Вычисление аргументов целевой функции, придающих ей экстремальное значение, осуществляется путем совместного решения уравнений прямых, пересекающихся в найденной вершине [10, 11].

Методы исследования

Пусть некая сервисная компания, реализующая услуги по разработке «Программы буровых растворов», решает задачу определения минимальной стоимости приготовления общего количества биополимерного раствора для проходки двух интервалов скважин с соответствующим содержанием ингредиентов. Методы исследования включают постановку задачи линейного программирования, решение ее графоаналитически и путем программного решения на компьютере, а также анализ полученного решения.

Для приготовления 1 м³ раствора I (раствора для интервала I) было использовано: 0,2 % биополимера, 4 % ингибирующей добавки, 0,8 % полимера. Для приготовления раствора II (раствора для интервала II) – 0,4 % биополимера, 2 % ингибирующей добавки и 0,6 % полимера. Причем для проходки интервала I требуемый объем раствора в два раза превышал объем раствора, необходимого для интервала II.

Данные требуемого состава буровых растворов и ресурс ингредиентов приведены в табл. 1. Буровое предприятие не испытывает недостатка в ингибирующей добавке, хотя условно ограничило ресурс по этой добавке в 1000 кг.

Требуется определить затраты на приготовление общего количества бурового раствора, если стоимость приготовления 1 м³ раствора I составляет 1952, а раствора II – 1384 руб.

Формулировка задачи осуществляется следующим образом.

Требуется найти минимум функции

$$F = 1952 \cdot x_1 + 1384 \cdot x_2$$

при ограничениях

$$\begin{cases} 2x_1 + 4x_2 \leq 105 \\ 8x_1 + 6x_2 \leq 245 \\ 40x_1 + 20x_2 \geq 1000, \\ x_1 = 2x_2 \\ x_1, x_2 \geq 0 \end{cases}$$

где x_1 и x_2 – искомое количество бурового раствора, необходимое для проходки интервалов I и II, м³. В табл. 1 ингредиенты приняты в процентах от объема, в ограничениях коэффициенты при неизвестных представляют весовые единицы, кг/м³.

Матричная форма записи задачи представлена ниже [12]:

$$c^T X \rightarrow \min, c = \begin{bmatrix} 1952 \\ 1384 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 8 & 6 \\ 40 & 20 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} 105 \\ 245 \\ 1000 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Таблица 1

Условия задачи

Table 1

Problem specification

Ингредиент	Состав бурового раствора, %		Ресурс, кг
	Раствор I	Раствор II	
Биополимер	0,2	0,4	105
Ингибирующая добавка	4	2	1000
Полимер	0,8	0,6	245
Стоимость 1 м ³ бурового раствора, руб.	1952	1384	–



Для графического решения построим на плоскости (x, y) четыре прямые, соответствующие ограничениям по трем ресурсам и ограничению по объемам раствора. Количество раствора для интервала II откладывается по оси x , для интервала I – по оси y . Построение прямых произведено в среде MATLAB, код программы построения ограничений показан на рис. 1, сам график представлен на рис. 2.

На рис. 2 показаны прямые, отображающие ограничения задачи и направление градиента целевой функции. Линия $\text{grad } F$ означает направление наискорейшего изменения функции цели, а перпендикулярная ей линия при ее перемеще-

нии в область допустимых решений определяет положение оптимальной точки [13]. Так как в поиске минимум функции цели, указанный перпендикуляр перемещается в направлении антиградиента и он (перпендикуляр) будет сходиться с области допустимых решений в точке a . В этой точке пересекаются линии $8x_1 + 6x_2 = 245$ и $40x_1 + 20x_2 = 1000$, решая совместно эти уравнения, находим $x_1 = 20$ и $x_2 = 10$. Найденные таким образом значения координат придают функции цели минимум, равный 52880 руб.

Таким образом, исходя из ресурса ингредиентов (см. табл. 1), для бурения в интервале I можно приготовить 20 м³ раствора I и 10 м³ раствора II для интервала II общей стоимостью 52880 руб.

```
y1=52.5-2*x;  
y2=245/8-3/4*x;  
y3=25-1/2*x;  
x=1:0.2:30;  
y4=2*x;  
plot(x,y1,'k',x,y2,'r',x,y3,'b',x,y4,'c');  
grid on  
legend('2x1+4x2=105','8x1+6x2=245','40x1+20x2=1000','y=2x')  
hold on  
for c=0:30  
y=1384/1952*x  
plot(x,y,'g');  
grid on;  
end
```

Рис. 1. Код программы построения прямых, отображающих ограничения
Fig. 1. Code of the program for constructing the lines representing the constraints

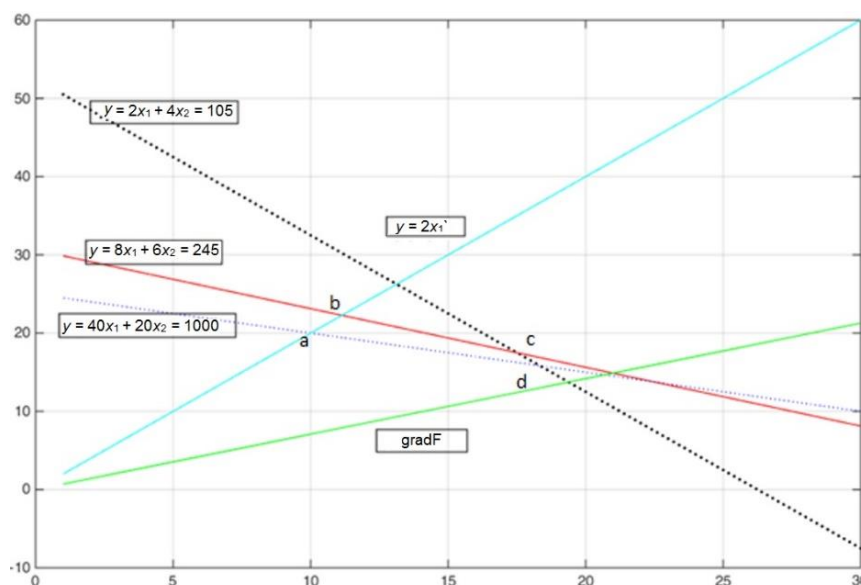


Рис. 2. Определение области допустимых решений

$abcd$ – область допустимых решений

Fig. 2. Definition of the feasible region

$abcd$ – feasible region



Очевидно, что программная среда MATLAB значительно упрощает построение графиков и их интерпретацию [14, 15].

Однако в среде MATLAB имеется команда `linprog`, позволяющая решать задачи линейного программирования. На рис. 3 представлен код программы `linprog` решения рассмотренной выше задачи. Из рис. 3 видно: составленный программный код выдал тот же результат, что и при решении задачи графоаналитическим методом, а именно: для интервала I скважины необходимо приготовить 10 м³ бурового раствора и для интервала II из имеющегося ресурса можно приготовить 20 м³ бурового раствора.

Необходимо отметить, что среда MATLAB является удобным инструментом при решении задач оптимизации, особенно при решении задач линейного программирования: составив основной код, можно подстраивать его под определенную задачу даже большой размерности [16].

Результаты исследования

Таким образом, осуществлена постановка задачи линейного программирования, представлено ее решение графоаналитическим методом с привлечением программного кода среды MATLAB для построения графика и специального кода `linprog` для основного решения задачи.

При решении задач линейного программирования, в которых рассматривается оптимальное расходование ресурсов, возникает проблема качества плана, состоящая в полноте использования

наличных ресурсов и степени пропорциональности планируемых остатков ресурсов их располагаемому наличию [17].

При решении задачи получилось, что не все ресурсы будут использованы. Подставляя полученные объемы раствора в ограничения по ресурсам, определяем их плановое потребление. В табл. 2 показаны количества неиспользованных ресурсов и процент их использования.

В качестве оценки пропорциональности в источнике [17] предлагается использовать показатель структурных сдвигов:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (d_i - d_{i,0})^2}{m}}, \quad (1)$$

где d_i , $d_{i,0}$ – удельный вес отдельных видов ресурсов в общем объеме их наличия и планируемого потребления соответственно, $i = 1 \dots m$.

Далее в источнике [17] предлагается показатель эффективности плановых расчетов:

$$E_{pr} = S / \frac{\sum_i b_{i,0}}{\sum_i b_i}, \quad (2)$$

где $\sum_i b_i$ – суммарный объем располагаемых ресурсов; $\sum_i b_{i,0}$ – планируемый объем их использования.

По минимуму этого показателя оценивается план использования располагаемых ресурсов, то есть лучшему оцениваемому варианту плана соответствует меньший по цифровому значению показатель E_{pr} .

Для определения показателя эффективности плановых расчетов в табл. 3 представлены его составляющие.

```
>> f=[-1952 -1384];
A=[2 4;8 6;40 20];
b=[105 245 1000];
Aeq=[1 -2];
Beq=0;
[x,fval]=linprog(f,A,b,Aeq,Beq,[],[])
Optimization terminated.
x=
20.0000
10.0000
fval=
-5.2880e+04
```

Рис. 3. Код решения оптимизационной задачи линейного программирования с использованием команды `linprog`

Fig. 3. The code for solving the linear optimization problem using the `linprog` command



Таблица 2

Характеристика использования ресурсов

Table 2

Description of the resources use

Вид ресурса	Остаток ресурса, кг	Планируемая доля ресурса, %	Объем ресурса, кг	Планируемый объем ресурса
Биополимер	5	95,2	105	100
Полимер	45	81,6	245	200
Ингибитор	200	80	1000	800
Общий объем ресурсов	–	–	1350	1100

Таблица 3

Расчет составляющих показателя эффективности плана

Table 3

Calculation of the plan effectiveness index components

Вид ресурса	Удельный вес ресурса	Удельный вес планируемого ресурса	Суммарный объем располагаемого ресурса	Планируемый объем располагаемого ресурса	Разность удельного веса
Биополимер	0,078	0,074	105	100	0,004
Полимер	0,181	0,148	245	200	0,033
Ингибитор	0,741	0,593	1000	800	0,148

Подставив соответствующие значения из табл. 3 в формулу (1), получим
 $S = 0,051$.

Подставив значения из табл. 3 в формулу (2), получим

$$E_{pr} = 0,0626.$$

Таким образом, показатель качества плана оказался хуже по сравнению с показателями планов, рассматриваемых в источнике [17], (0,38–0,42). Улучшая структуру первоначальных ресурсов путем уменьшения каждого хотя бы на 4 % (100,8; 230,2; 960), получаем $E = 0,4$,

что значительно улучшает качество плана. Однако лучшей структурой ресурсов было бы уменьшение первого на 4 %, остальных – на 20 %.

Заключение

Решение задач оптимизации методами линейного программирования в сфере бурения скважин возможно благодаря развитому математическому аппарату, чувствительности анализа модельного решения задачи и более широкому использованию вычислительной техники.

Библиографический список

1. Sallan J.M., Lordan O., Fernandez V. Modeling and solving linear programming with R. Catalonia: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015. 108 p.
2. Vanderbei R.J. Linear programming: foundations and extensions. New York: Springer, 2014. 414 p.
3. Luenberger D.G., Ye Y. Linear and nonlinear programming. New York: Springer, 2008. 541 p.
4. Rao S.S. Engineering optimization: theory and practice. Hoboken: Wiley, 2009. 813 p.
5. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 416 с.
6. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Регсдел К. Оптимизация в технике / пер с англ. В 2 кн. Кн. 1. М.: Мир, 1986. 349 с.
7. Данциг Д. Линейное программирование, его применения и обобщения / пер с англ. М.: Прогресс, 1966. 603 с.
8. Bornemann F. Numerical linear algebra: a concise introduction with MATLAB and Julia. Cham: Springer, 2018. 157 p.
9. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.
10. Банди Б. Основы линейного программирования / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 176 с.



11. Уайлд Д. Оптимальное проектирование / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 272 с.
12. Васильев Ф.П., Иваницкий А.Ю. Линейное программирование. М.: Факториал, 1998. 176 с.
13. Кульневич А.Д. Линейное программирование // Молодой ученый. 2017. № 10. С. 29–32.
14. Бородин Г.А., Титов В.А., Маслякова И.Н. Использование среды MatLab при решении задач линейного программирования // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-1. С. 23–26.

15. Рыкин О.Р. Линейное программирование в Матлабе. Универсальные линпрогоптимизаторы: производительность и табличный формат результата. Задания и задачи: монография. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2016. 208 с.
16. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2010. 976 с.
17. Карганов С.А. Решение задач линейного проектирования методов структурной оптимизации // Управление экономическими системами. 2012. № 7 (43) [Электронный ресурс]. URL: <http://uecs.ru/uecs43-432012/item/1443-2012-07-13-06-59-58> (02.12.2019).

References

1. Sallan JM, Lordan O, Fernandez V. *Modeling and solving linear programming with R*. Catalonia: Universitat Politècnica de Catalunya; 2015. 108 p.
2. Vanderbei RJ. *Linear programming: foundations and extensions*. New York: Springer; 2014. 414 p.
3. Luenberger DG, Ye Y. *Linear and nonlinear programming*. New York: Springer, 2008. 541 p.
4. Rao SS. *Engineering optimization: theory and practice*. Hoboken: Wiley; 2009. 813 p.
5. Liu B. Theory and practice of indefinite programming, 2005, 416 p. (Russ. ed.: *Teoriya i praktika neopredelennogo programmirovaniya*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2005. 416 p.)
6. Reklitis G, Reivindran A, Regsdel K. Optimization in technology, 1986, 349 p. (Russ. ed.: *Optimizatsiya v tekhnike*. In 2 books. Book 1. Moscow: Mir; 1986. 349 p.)
7. Dantzig GB. Linear programming: applications and generalizations, 1966, 603 p. (Russ. ed.: *Lineinoe programmirovaniye, ego primeneniya i obobshcheniya*. Moscow: Progress; 1966. 603 p.)
8. Bornemann F. *Numerical linear algebra: a concise introduction with MATLAB and Julia*. Cham: Springer; 2018. 157 p.
9. Demidovich BP, Maron IA. *Fundamentals of computational mathematics*. Moscow: Nauka; 1966. 664 p. (In Russ.)
10. Bunday BD. Basic linear programming, 1989, 176 p. (Russ. ed.: *Osnovy lineinogo programmirovaniya*. Moscow: Radio i svyaz; 1989. 176 p.)
11. Wilde DJ. Optimal design, 1981, 272 p. (Russ. ed.: *Optimal'noye proektirovaniye*. Moscow: Mir; 1981. 272 p.)
12. Vasil'ev FP, Ivanitskii AYU. *Linear programming*. Moscow: Faktorial; 1998. 176 p. (In Russ.)
13. Kul'nevich AD. Linear programming. *Molodoi uchenyi*. 2017;10:29–32. (In Russ.)
14. Borodin GA, Titov VA, Maslyakova IN. Solving linear programming problems with MatLab. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016;11-1:23–26. (In Russ.)
15. Rykin OR. *Linear programming in Matlab. Multipurpose linprog optimizers: capacity and a table format of the result. Target and problems*. Saint Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2016. 208 p. (In Russ.)
16. D'yakonov VP. *MATLAB and SIMULINK for radio engineers*. Moscow: DMC Press; 2010. 976 p. (In Russ.)
17. Karganov SA. Solving of linear programming by method of structural optimization. *Management of Economic Systems*. 2012;7. Available from: <http://uecs.ru/uecs43-432012/item/1443-2012-07-13-06-59-58> [Accessed 2nd December 2019]. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Ламбин А.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Anatoly I. Lambin is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final version of this manuscript.



Сведения об авторе / Information about the author



Ламбин Анатолий Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: alambin@ex.istu.edu
Anatoly I. Lambin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: alambin@ex.istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-96-102>

Анализ работы алмазных долот при строительстве скважин в сложных условиях

© В.И. Зайцев^a^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования – анализ применения алмазных долот – долот типа PDC (polycrystalline diamond cutters – поликристаллические алмазные резцы) – при их работе в районах со сложным геологическим разрезом, а также разработка рекомендаций для дальнейшего усовершенствования инструмента. Долота PDC созданы для бурения породы мягкой и средней твердости, в регионах со сложным геологическим разрезом применение данных долот было неэффективным. В ходе работы изучалась механика образования нароста на резцах долота и его воздействие на разрушение горной породы. Исследовалось влияние прокачивания объема бурового раствора и перепада давления в винтовом забойном двигателе на механическую скорость бурения долота PDC. Выдвинут ряд предложений по улучшению геометрии и ориентации резцов инструмента, изменению конструкции площадки калибрующего вооружения и лопастей долота. Предложен ряд мер по уменьшению забойных вибраций долота при его работе. В результате установлен механизм возникновения нароста на рабочей грани резца и его опережающее воздействие на образование трещин в объемном слое породы. Выявлено влияние максимальной подачи раствора на полное отсутствие сальникообразования и резкое увеличение механической скорости бурения. Большую эффективность показали винтовые забойные двигатели с высоким крутящим моментом, найдены оптимальные диапазоны падения давления у долот PDC в зависимости от скорости потока раствора. Предложены методы уменьшения вибраций и стабилизации долот PDC при помощи применения конструктивного исполнения и геометрического улучшения резцов и лопастей инструмента, введения гибридных резцов в качестве резцов вспомогательных. Использование усовершенствованных долот PDC поможет повысить эффективность их работы в сложных геолого-технических условиях Восточной Сибири и Якутии.

Ключевые слова: бурение скважин, резцы PDC, долото, испытание

Информация о статье: Дата поступления 08 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 11 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Зайцев В.И. Анализ работы алмазных долот при строительстве скважин в сложных условиях. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 96–102. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-96-102>

Analysis of diamond drill bit operation in well drilling under complicated conditions

© Vitaly I. Zaitsev^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study has been to analyze the operation of diamond drill bits of a PDC type (polycrystalline diamond cutters) in the regions with a complex geological section, and to develop recommendations on optimizing the drill bits. The PDC drill bits are originally designed for soft to medium-hard rocks, thus being ineffective for complex geological sections. As part of the research, the mechanics of the build-up formation on the drill bit cutter and its impact on the rock destruction have been studied. The influence of the pumped drilling mud volume and the pressure differential in the downhole motor on the mechanical drilling speed of the PDC bit has been analyzed. Proposals on improving the geometry and orientation of the tool cutters and optimizing the design of the cutting structure calibration site and the bit blades have been given; measures on reducing the bottomhole vibrations of the bit during its operation have been suggested. As a result of the study, the mechanism of the build-up formation on the cutter's working edge and its advance influence on the fracturing in the rock volumetric stratum has been determined. It has been found that the maximum feed of the drilling mud results in the complete absence of the build-up formation and a sharp increase in the mechanical speed of drilling. The study has shown the high performance of high-torque downhole screw motors and defined the optimum range of the pressure differential for the PDC drill bits as a function



of the drilling mud flow rate. The authors have suggested the ways to reduce the vibration and stabilize the PDC drill bits by optimizing the structure and geometry of the tool's cutters and blades, and by using hybrid cutters as auxiliary ones. The conclusion is that the optimization of the PDC drill bits enhances their operation performance under complicated geological-engineering conditions in Eastern Siberia and Yakutia.

Keywords: well drilling, PDC cutters, drill bit, testing

Information about the article: Received December 08, 2019; accepted for publication February 11, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Zaitsev VI. Analysis of diamond drill bit operation in well drilling under complicated conditions. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):96–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-96-102>

Введение

В последнее время при бурении нефтегазовых месторождений особое внимание уделяется повышению технико-экономических показателей за счет использования эффективного бурового инструмента [1, 2]. Буровые долота составляют только долю (1–5 %) от общей стоимости скважины, но являются основным компонентом экономики строительства скважины. Время, необходимое для бурения скважины, напрямую зависит от скорости бурения, которая обеспечивается долотом, и от продолжительности его работы до износа. На основе относительной стоимости проходки одного метра инвестирование в правильно выбранное долото значительно снизит время бурения и количество спуско-подъемных операций.

При бурении новыми алмазными долотами – долотами типа PDC (polycrystalline diamond cutters – поликристаллические алмазные резцы) – обеспечивается большая механическая скорость проходки, как и сама проходка на долото по сравнению с бурением алмазными и трехшарошечными долотами при меньших энергетических затратах. При применении долот PDC разрушение породы осуществляется путем резания. Из всех основных механизмов разрушения горной породы резание является наиболее эффективным методом, потому что прочность на растяжение пород обычно меньше прочности на сжатие.

На месторождениях Восточной Сибири и Якутии геологические разрезы сложнее, чем в Западной Сибири. В данных районах наблюдаются плотные доломиты и известняки, соль и мергель

различной крепости. В условиях карбонатных пород чередуются породы V–IX категорий твердости. Присутствуют труднобуримые пропластки. Выпускаемые же долота PDC в основном предназначены для пород не выше VI категории буримости и средней, а также высокой абразивности [3]. Преимуществами долот PDC перед шарошечными долотами являются отсутствие в их составе подвесных элементов (деталей), высокая износостойкость и при этом самозатачиваемость за счет опережающего изнашивания твердосплавной матрицы по сравнению с износом алмазного слоя. Долото PDC имеет высокую устойчивую механическую скорость бурения, что объясняется эффектом самозатачивания инструмента. Тем не менее в Восточной Сибири и Якутии в условиях карбонатных коллекторов и трещиноватых пород применяемые долота PDC показывают невысокую стойкость и прочность, выходят из строя. В связи с этим необходимо разрабатывать более рациональный инструмент и технологию его применения [4].

Материалы

и методы исследования

В настоящее время в Сибири и Якутии для бурения нефтегазовых наклонно-направленных и горизонтальных скважин сплошным забоем широко применяются долота PDC почти всех ведущих производителей мира. В данной работе проанализирована эксплуатация долота PDC на Талаканском, Верхнечонском месторождениях и Куюмбинской площади. Резцы PDC показали стойкое сопротивление абразивному износу и большую чувствительность к ударной нагрузке.



Рассматривались долота 220,7 FD 368-MH-A80-01; БИТ 292,9 В 716 УСМ; MDi 713NPX производства компании Smith. Режимы бурения: роторный способ при комбинированном бурении гидравлическим винтовым забойным двигателем с нагрузкой на долото 80–13 кН, частотой вращения 50–200 об./мин, расходе бурового раствора до 40 л/с и давлении 10–15 МПа.

При бурении сложного и «неудобного» геологического разреза механическая скорость проходки и проходка на долото падают. Незначительная проходка, ограниченная опережающим износом вооружения, делала нерациональным применение долот PDC. При бурении наблюдался как механический, так и термомеханический износ резцов. Бурение кремнистых участков, крепких доломитов, пород с вертикальной и субвертикальной трещиноватостью, твердых и переслаивающихся пород приводит к многочисленным сколам на резцах, отслаиванию и выкрашиванию алмазосодержащих пластин, слому и даже вырыванию режущих деталей.

Необходимо выработать новые технологические материалы и конструкции долот для бурения сложных геологических разрезов. Оптимизировать режущие механизмы на сопротивление ударным нагрузкам, увеличить их термостойкость и вибрационную стойкость, разработать более совершенные конструкции долот, в том числе гибридные.

Результаты исследования и их анализ

При бурении скважин следует учитывать такие параметры, как тип горной породы и планируемый режим вращения долота. Замечено, что при бурении мягких пород и пород средней прочности происходит их резание, а при бурении твердых пород – хрупкое разрушение путем скалывания. Причем способ разрушения породы зависит не только от ее прочности, но и от таких параметров скважины, как температура и давление в ней [1, 5].

При хрупком скалывании порода разрушается с очень небольшой или нулевой деформацией. При пластическом разрушении порода упруго деформируется до предела текучести, после которого происходит пластическая деформация до разрыва.

При бурении долотами PDC на резцы действуют вертикальная сила веса колонны и горизонтальная сила от ротора. Главными при этом являются приложенные касательные силы [6, 7]. Полученная равнодействующая сила, по нашему мнению, определяет плоскость упора резца. В результате при бурении элемент породы сдвигается под определенным углом относительно плоскости упора резца, который зависит от прочности породы.

Разбуриванию поверхностного слоя забоя помогает образующееся ядро сжатия на рабочей поверхности резца. Форма и размер ядра зависят от свойств горной породы и скорости воздействия на нее. На некоторых рабочих поверхностях резца долота после его поднятия на дневную поверхность можно увидеть неразрушенные наросты (ядра сжатия) в виде усеченного конуса с расширением к нижнему краю резца. Картина образования таких наростов на резцах долота схожа с образованием и мгновенным удалением таких же наростов при токарной обработке пластмасс и мягких металлов.

Нарост прилипает к неровностям передней грани резца со значительной силой в зависимости от положения инструмента и шероховатой рабочей грани резца [8]. Именно наросты создают опережающее воздействие на породу, а затем уже передняя поверхность инструмента. Нарост создает трещины в ближайшей к резцу области породы. Трещины увеличиваются благодаря сдавливанию резцом. Происходит объемное разрушение породы по линиям сдвига и ее отброс в стороны от проложенной борозды с захватом отбуренной породы потоком раствора и вынос ее на поверхность. В результате анализа подачи



раствора на месторождениях при бурении рекомендуется подавать максимальное количество бурового раствора, не ограничивая его объем. Так, на Талаканском месторождении при бурении на скоростях 50–150 об./мин долотом PDC механическая скорость бурения была увеличена на 40–55 % при повышении расхода раствора с 32 до 40–50 л/с. При этом поднятое на поверхность долото и резцы были чистыми, без следов сальникообразования.

Для увеличения проходки на долото и улучшения управляемости рекомендуется применять резцы уменьшенного диаметра, до 12–13 мм, с увеличенным количеством гидромониторных насадок.

В Западной Сибири при бурении наклонно-направленной эксплуатационной скважины применялось долото БИТ 215,9 ВТ 519 УСВ, 32-01 с резцами уменьшенного диаметра до 13 мм и увеличенным количеством гидромониторных насадок до восьми вместо обычных пяти. При этом расположение их в корпусе было подобрано таким образом, чтобы улучшить вынос шлама из призабойной зоны [9]. В результате была увеличена проходка на долото с сохранением показателя механической скорости и улучшенной управляемостью. Данная модель показала высокую стойкость и повышенную способность набирать необходимые параметры кривизны.

При работе с забойным двигателем для эффективности работы PDC рекомендуется, чтобы скорости потока бурового раствора были в верхнем диапазоне скоростей двигателя, так как работа со скоростями из нижнего диапазона приводит к ограничению нагрузки на долото и, соответственно, к уменьшению вращающего момента, что влияет на скорость проходки.

Как показывает опыт бурения с применением забойных двигателей, для использования долот PDC более эффективны забойные двигатели с высоким моментом вращения. Это особенно видно,

когда скорости потока раствора и его давление на дневной поверхности ограничены.

Для забойных двигателей с высоким моментом и низкой скоростью вращения рекомендуется иметь падение давления в диапазоне 4,1–5,5 МПа, для двигателей с более высокой скоростью вращения падение давления должно быть в диапазоне 7–8,3 МПа.

Для бурения с большим отклонением от вертикали общее падение давления при применении забойных двигателей рекомендуется в диапазоне 8,3–10 МПа.

Практический опыт показывает, что долото PDC работает лучше, если оно снабжено насадками для достижения высоких скоростей раствора. Высокое давление при этом не требуется. Скорости потока раствора для долот PDC с открытыми насадками должны превышать 35 л/с для ствола насадки в $\frac{1}{2}$ дм и 45 л/с в $\frac{1}{4}$ дм, конечно, с коррекцией в зависимости от литологии и типа бурового раствора.

Кроме того, обильная подача раствора не дает повышаться температуре резцов выше 700 °С [10]. При достижении данной температуры резцы быстро изнашиваются из-за неравномерности теплового расширения между связкой (кобальтом) и алмазом. Поэтому при бурении твердых пород лучше использовать термостойкие резцы PDC. Их истирающее действие обеспечивает разрушение цементирующих веществ, связывающих отдельные зерна породы. Резцы с TSP (thermally stable polycrystalline – поликристаллические термостойкие) устойчивы до температуры 2100 °С [11, 12].

Для эффективной ориентации резцов относительно корпуса долота рекомендуется такое их расположение, при котором нагрузка на них во время эксплуатации создавалась бы только под действием сил сжатия.

Что касается подбора материала матрицы резца, его геометрических характеристик и скорости вращения



долота, то эти вопросы рассматривались автором данной статьи ранее^{1,2}.

Также важную роль для всего процесса бурения играет стабильность долота PDC. На забое долота совершают хаотичные движения, которые включают боковые, осевые и крутильные колебания, отмечающиеся отдельно и в комплексе. Забойные вибрации снижают срок службы отдельных резцов, они мешают контролю траектории скважины, создают ствол неправильной формы и невыдержанного диаметра.

На Талаканском месторождении долота PDC производства «Буринтех» и Steeringwhell применялись с активным калибрующим резцом, который обеспечивает агрессивную способность бокового резания из-за малых передних углов. При этом улучшилась управляемость в отношении изменения траектории движения, снизилось трение калибрующего вооружения о стенки скважины, уменьшились затяжки и реактивный крутящий момент.

Предлагается влияние крутящего момента снизить уменьшением переднего угла резцов до $-5...-10^\circ$, ограничить размеры резцов до диаметров 13–14 мм, а в качестве вспомогательных резцов применять гибридные резцы.

Для уменьшения прихвата-скольжения рекомендуем применять гибридные долота PDC с импрегнированными резцами на калибрующей части инструмента. Такие резцы будут ограничивать проникновение в породу стенок ствола и сглаживать резкие изменения крутящего момента. В настоящее время применяемые долота PDC имеют в качестве вооружения калибрующей части такие же резцы, как и резцы на забое. При колебании они выхватывают элементы породы стенки ствола скважины и этим создают ствол овальной формы и ненормативного диаметра.

Балансировать долото PDC можно и с помощью конструктивных особенностей, например, создавая спиральные площадки калибрующего вооружения. Они будут снижать способность долота к боковому проникновению или долблению стенок скважины за счет увеличения кругового контакта. Создавая спиральные лопасти, мы будем приближать точку вращения долота к центру.

Таким образом, для долот PDC рекомендуется применение низкофрикционного калибрующего вооружения на одной стороне долота и размещение резцов таким образом, чтобы все неуравновешенные силы были в направлении калибровочного вооружения.

Рекомендуется также для бурения наклонно-направленных скважин применять долота общей короткой длины.

Заключение

На сегодняшний день основными ресурсами использования долот PDC являются применение износостойких резцов, улучшение конструкции лопастей и корпуса долота, рациональные величина и ориентация режущих элементов, а также их размещение, балансировка инструмента и оптимизация бурового раствора для резания-скалывания разных пород.

В данном исследовании описан процесс разрушения горных пород с образованием нароста на рабочей поверхности резца и его опережающее воздействие на породу. Приведены опытные данные по подаче количества бурового раствора для улучшения выноса шлама и препятствия сальникообразованию. Рассмотрены вопросы стабильности работы долота PDC, так как возникающие боковые, осевые и крутильные колебания приводят к вибрациям, которые, в свою очередь, снижают срок службы долота.

¹ Зайцев В.И., Карпиков А.В., Че В.В. Исследование применения долот PDC // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 5. С. 58–66.

² Зайцев В.И., Карпиков А.В., Осипов В.Г. Применение долот PDC на месторождениях Восточной и Западной Сибири // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4. С. 62–69.



Согласно опытным данным, приведены рекомендации по улучшению конструкции долот для стадии их проектирования и доработки.

Оптимизация конструкции долот типа PDC, применение нового типа

долот – так называемых гибридных долот PDC – позволит частично решить проблему качественного строительства скважины, в том числе за счет их балансировки и снижения таким образом вибраций инструмента.

Библиографический список

1. Сверкунов С.А., Карпиков А.В. Исследование штыревых и алмазных долот на месторождениях нефтегазоносных площадей севера Красноярского края // Геонаука-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Вып. 12. Иркутск, 2012. С. 148–152.
2. Че В.В., Заливин В.Г. Эффективность применения долот PDC на нефтяных месторождениях Западной и Восточной Сибири // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. С. 137–144.
3. Рабиа Х. Технология бурения нефтяных скважин / пер. с англ. М.: Недра, 1989. 361 с.
4. Шарипов А.Н., Храмов Д.Г., Ковалевский Е.А. Оптимизация конструкций долот PDC, направленная на снижение времени бурения секции под эксплуатационную колонну // Бурение и нефть. 2013. № 6. С. 42–44.
5. Пушмин П.С. Возможные направления интенсификации процесса разрушения твердых горных пород // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2004. № 4 (20). С. 182.
6. Бурмистров И.А., Сокольников Д.С., Заливин В.Г. Результаты применения долот PDC на

месторождениях Восточной Сибири // Геонаука-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Вып. 12. Иркутск, 2012. С. 163–167.

7. Чворо Е.О., Поминова Е.О. Результаты отработки долот типа PDC на месторождениях Томской области // Проблемы геологии и освоения недр: сб. тр. науч. симпозиума. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. С. 450.

8. Гусман А.М., Лышенко А.А. Пути создания эффективных долот PDC для бурения крепких пород // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2009. № 1. С. 24–27.

9. Пикетт С. Техника отклонения инструмента при наклонно-направленном бурении: в прошлом, настоящем и будущем // Нефтяная инженерия. 1987. С. 41–43.

10. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е. Исследование подачи и модуля скорости при вращательном бурении горных пород // Интервал. 2006. № 2. С. 25–27.

11. Брауз М. Применение гидравлики: ключ к эффективному бурению // Нефть мира. 1982. Октябрь. С. 13–16.

12. Робинсон Л. Улучшение гидравлических долот для увеличения скорости проникновения в породу // Нефть мира. 1982. Июль. С. 24–26.

References

1. Sverkunov SA, Karpikov AV. Study of carbide and diamond drill bits in the oil-and-gas fields of the north of the Krasnoyarsk Territory. In: *Geonauka-2012: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = Geonauka-2012: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference. Iss. 12. Irkutsk; 2012. p.148–152. (In Russ.)
2. Che VV, Zalivin VG. Efficiency of PDC bits in the oil fields of Western and Eastern Siberia. In: *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri* = Development of the mineral resources base in Eastern Siberia. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2012. p.137–144. (In Russ.)
3. Rabia H. Oilwell drilling engineering: principles and practice. Graham & Trotman; 1989. 400 p. (Russ. ed.: *Tekhnologiya bureniya neftyanykh skvazhin*. Moscow: Nedra; 1989. 361 p.).
4. Sharipov AN, Khramov DG, Kovalevskiy EA. PDC bits' constructions optimization to decrease speed of section drilling for exploitation string. *Burenie i nef't*. 2013;6:42–44. (In Russ.)

5. Pushmin PS. Potential directions in the intensification of hard rock destruction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2004;4:182. (In Russ.)

6. Burmistrov IA, Sokol'nikov DS, Zalivin VG. Results of the PDC drill bit usage at the Eastern Siberian deposits. In: *Geonauka-2012: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = Geonauka-2012: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference. Iss. 12. Irkutsk; 2012. p.163–167. (In Russ.)

7. Chvoro EO, Pominova EO. Results of the PDC drill bit usage at the deposits of Tomsk region. In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr* = Issues of geology and resource extraction. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2016. p.450. (In Russ.)

8. Gusman AM, Lyshenko AA. Development of high performance PDC bits for hard formations. *Vestnik Assotsiatsii burovyykh podryadchikov* = Bulletin of the Association of Drilling Contractors. 2009;1:24–27. (In Russ.)



9. Pikett S. Tool deflection techniques in directional drilling: past, present and future. *Neftyanaya inzheneriya*. 1987:41–43. (In Russ.)

10. Tret'yak AYa, Litkevich YuF, Aseeva AE. Study of the feed and module of velocity in rotation rock drilling. *Interval*. 2006;2:25–27. (In Russ.)

11. Brauz M. Practical hydraulics: key to efficient drilling. *Neft' mira*. 1982:13–16. (In Russ.)

12. Robinson L. Optimization of hydraulic drill bits as a way to increase the rock penetration rate. *Neft' mira*. 1982:24–26. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Зайцев В.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Vitaly I. Zaitsev is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторе / Information about the author



Зайцев Виталий Иванович,

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры нефтегазового дела,

Институт недропользования,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: zaicshev@istu.edu

Vitaly I. Zaitsev,

Cand. Sci. (Eng.), Docent,

Associate Professor, Oil and Gaz Department,

Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: zaicshev@istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.313.004.67:622

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-103-110>

Послеремонтные испытания электрических машин шагающих экскаваторов

© А.В. Сорокин^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Экскаваторы-драглайны являются основным средством механизации горных работ при вскрыше угольных месторождений. Надежность функционирования и производительность вскрышных шагающих экскаваторов определяет эффективность работы горных предприятий. В связи с этим цель данного исследования заключалась в повышении надежности работы электромеханического оборудования экскаваторов. Основным методом исследования было моделирование электромагнитных процессов послеремонтных испытаний электрических машин экскаваторов. Проведенные исследования показали, что выход из строя горного оборудования, эксплуатирующегося в условиях Севера, имеет как механическую, так и электромеханическую природу поломок. Отказы, связанные с электромеханическими аварийными ситуациями, чаще вызваны выходом из строя электрических машин постоянного тока главных приводов экскаваторов. Для обеспечения высокого качества ремонта и уменьшения вероятности поломки все электрические машины после ремонта должны пройти соответствующие испытания, в том числе и испытания под нагрузкой. Существующие методы нагружения предполагают механическое агрегирование электрической машины с нагрузочными устройствами. Реализовать эти методы для испытания крупных электрических машин постоянного тока в условиях ремонтных предприятий оказывается сложно. Очевидна перспектива и важность разработки методов испытания, исключающих механическое агрегирование с нагрузочными устройствами. К таким методам относится метод статического нагружения электрических машин. Предложенный способ заключается в разделении испытания на два этапа: на первом этапе производится статическое токовое нагружение, а на втором – динамическое токовое и механическое нагружения в режимах, приближенных к эксплуатационным. Исследования разработанной системы управления электроприводом испытательного стенда показали, что система работоспособна и позволяет проводить испытания электрических машин постоянного тока в полном объеме.

Ключевые слова: система управления, электропривод, экскаватор, испытательный стенд, испытание двигателей постоянного тока

Информация о статье: Дата поступления 16 января 2020 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Сорокин А.В. Послеремонтные испытания электрических машин шагающих экскаваторов. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 103–110. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-103-110>

Post-repair testing of the walking excavators' electrical machines

© Alexander V. Sorokin^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Dragline excavators are the main means of mechanization in mining coal fields. The operational reliability and in-use performance of the overburden dragline excavators determine the mining enterprises' capacity. The aim of the study is to increase the reliability of the excavators' electromechanical equipment. The main research method is modeling of the electromagnetic processes taking place in the after-repair tests of the excavator's electric machines. The study has shown that the failures of the mining equipment operating in the northern part of Russia are of both mechanical and electromechanical nature. The failures associated with electromechanical emergency conditions are more often caused by the failure of the direct-current electric machines of the excavators' main drives. To ensure the high quality of the repair and reduce the risk of failure, all electrical machines must undergo appropriate post-repair tests including those under load. The existing loading methods involve mechanical aggregation of the electric machine with the load devices. It is difficult to implement these methods when testing large direct-current electric machines in the conditions of the repair plants. Obviously, the development of the test methods that



exclude mechanical aggregation of the electric machines and load devices is important and promising. Static loading of electrical machines is proposed as one of the above methods. The method implies dividing the test in two stages. In the first stage, static current loading is performed, and in the second stage, dynamic current and mechanical loading are carried out in the modes close to operational ones. The study of the control system developed for the electric drive of the test stand has shown that the system is functional and allows the testing of the direct-current electric machines in full.

Keywords: control system, electric drive, excavator, test stand, direct-current motor testing

Information about the article: Received January 16, 2020; accepted for publication February 19, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Sorokin AV. Post-repair testing of the walking excavators' electrical machines. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):103–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-103-110>

Введение

Экскаваторы-драглайны являются основным средством механизации горных работ при вскрыше угольных месторождений. Надежность функционирования и производительность вскрышных шагающих экскаваторов определяет эффективность работы горных предприятий [1]. Проведенные ранее исследования [2–5] показали, что выход из строя горного оборудования, эксплуатирующегося в условиях Севера, имеет как механическую, так и электромеханическую природу поломок. Отказы, связанные с электромеханическими аварийными ситуациями, чаще вызваны выходом из строя электрических машин постоянного тока главных приводов экскаваторов. Для обеспечения высокого качества ремонта и уменьшения вероятности отказа в работе все электрические машины после ремонта должны пройти соответствующие испытания, включающие и испытания под нагрузкой. Существующие методы нагружения предполагают механическое агрегирование электрической машины с нагрузочными устройствами и отличаются друг от друга способом рассеивания механической энергии: преобразование в тепловую, передачу источникам или отдачу ее в питающую сеть¹ [6, 7]. Реализовать эти методы для испытания крупных электрических машин постоянного тока (до 2500 кВт), установленных на экскаваторах, в условиях рудоремонтных предприятий оказывается сложно.

Поэтому в настоящее время отремонтированные машины отправляют заказчику без проведения их испытаний под нагрузкой, что не позволяет качественно продиагностировать их и выявить дефекты, которые могут быть устранены на заводе до установки их на горных машинах.

В связи с этим очевидна перспектива и важность разработки методов испытания, исключающих механическое агрегирование с нагрузочными устройствами. К таким методам относится метод динамического нагружения [8, 9], который заключается в поддержании работы электрической машины в переходных режимах, регулирует напряжение на якоре или напряжение тока возбуждения с определенной частотой и амплитудой. Недостатком метода является сложность управления, а также то, что электрическая машина работает при испытании в режимах, не свойственных эксплуатационным. Ток электрической машины имеет пульсирующий характер с частотой задающего генератора. Коммутация электрической машины при таком нагружении непредсказуема.

Процесс нагружения электрической машины – это процесс одновременного токового и механического нагружения. Идея разработанного способа [10–12] заключается в разделении испытания на два этапа: на первом этапе производится статическое токовое нагружение, а на втором – динамическое токовое и механическое нагружения в режимах, приближенным к эксплуатационным. На первом

¹ Котеленец Н.Ф., Кузнецов Л.Н. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1988. 231 с.



этапе машина диагностируется с позиции качества монтажа, пайки, коммутации, нагрева, на втором этапе при ее работе в режимах пуска, наброса и сброса нагрузки, торможения, реверсирования с заданным током «отсечки» имитируются рабочие режимы и оцениваются коммутация, шумы, вибрация.

Данное исследование посвящено изучению электромеханических процессов статического нагружения электрических машин постоянного тока при послеремонтных испытаниях.

Материалы и методы исследования

Статическое токовое нагружение испытуемой машины производится одновременно регулированием напряжения на якоре и напряжения на обмотке возбуждения. При этом однако будет изменяться и скорость. Для стабилизации скорости необходимо одновременно изменять и напряжение на якоре. Следовательно, регулируя одновременно напряжение на якоре и напряжение на обмотке возбуждения, можно реализовать статическое токовое нагружение испытуемой машины при любой заданной скорости. Электрическая машина будет работать в режиме двигателя, а момент его будет равен моменту холостого хода. Максимальная мощность, требуемая от источника питания, не будет превышать величины, равной 10–15 % от номинальной мощности электрической машины. Следовательно, статическое токовое нагружение оказывается экономичным.

Испытательный стенд как система электропривода обладает интересной спецификой, обусловленной переменными параметрами объекта регулирования, причем параметры будут меняться в широком диапазоне, так как мощность испытуемых электрических машин различна и лежит в пределах от 50 до 2500 кВт. Кроме того, такой динамический параметр, как электромеханическая посто-

янная времени, будет изменяться при изменении магнитного потока. Поэтому для выявления особенностей поведения системы был проведен комплекс исследований на электронно-вычислительных машинах. Была составлена математическая модель испытательного стенда с общепринятыми допущениями², касающимися описания электромагнитной подсистемы. Поведение системы описывается уравнениями:

а) по каналу регулирования скорости:

$$\begin{aligned}U_{\Sigma\omega} &= U_{Y\omega} - \gamma\omega - \alpha U_{Yi}, \\E_{n1} &= K_{n1}U_{\Sigma\omega}, \\(T_{\Sigma\omega}p+1)i_{\Sigma\omega} &= E_{n1} / r_{\Sigma\omega}, \\E_{\Sigma} &= K_{\Sigma}i_{\Sigma\omega}, \\(T_{\Sigma}p+1)i_{\Sigma} &= (E_{\Sigma} - E_{\delta}) / r_{\Sigma}, \\E_{\delta} &= C\Phi_{\delta}\omega,\end{aligned}$$

б) по каналу регулирования тока якоря:

$$\begin{aligned}U_{\Sigma i} &= U_{Y\Phi H} - U_{Yi}, \\E_{n2} &= K_{n2}U_{\Sigma i}, \\(T_{\Sigma i}p+1)i_{\Sigma i} &= E_{n2} / r_{\Sigma i}, \\J_{\Sigma}p\omega &= M - M_{\Sigma}, \\ \Phi_{\Sigma} &= C_{\Phi}i_{\Sigma}, M = C\Phi_{\delta}i_{\Sigma}.\end{aligned}$$

Здесь $U_{Y\omega}$, U_{Yi} , $U_{\Sigma\omega}$ – напряжение задания по каналам скорости, напряжение обратной связи по заданию тока якоря и суммарное напряжение на входе регулятора скорости; γ – коэффициент обратной связи по скорости; α – коэффициент связи по заданию тока якоря; K_{n1} , K_{n2} – коэффициенты усиления первого и второго преобразователей; C , C_{Φ} – коэффициенты связи по электродвижущей силе и потоку; $T_{\Sigma\omega}$, $T_{\Sigma i}$, T_{Σ} – постоянные времени по цепи возбуждения генератора, двигателя и якорной цепи электрических машин; E_{n1} , E_{n2} , E_{Σ} , E_{δ} – электродвижущие силы первого, второго преобразователей, генератора и двигателя; ω – скорость двигателя; $i_{\Sigma\omega}$, $i_{\Sigma i}$, i_{Σ} – токи возбуждения генератора, двигателя и цепи якоря электрических машин; M – момент двигателя; M_{Σ} – момент холостого хода; J_{Σ} – момент инерции двигателя; $r_{\Sigma\omega}$, $r_{\Sigma i}$, r_{Σ} – сопротивления.

² Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.



$r_{\Sigma я}$ – суммарные сопротивления цепи возбуждения генератора, двигателя и цепи якорей электрических машин.

Для моделирования процессов, протекающих в испытательном стенде, применялась программа DiFSyS [13]. Данная программа позволяет:

- создавать системы дифференциальных уравнений с большим числом последних и решать их несколькими численными методами;

- в процессе решения системы изменять выражения самих уравнений;

- по результатам расчета систем выводить графики любых зависимостей переменных, непосредственно участвующих в расчете;

- использовать зону ограничений, которая предоставляет универсальные средства для контроля переменных и управления ими при расчете.

Ранее автором была предложена структура организации системы управления испытательным стендом машин постоянного тока [14–16]. Структурная схема двухканальной системы регулирования представлена на рис. 1.

Результаты исследования и их анализ

Проведенные исследования замкнутой системы регулирования дали возможность определить коэффициенты обратных связей системы, обеспечивающих требуемую точность задания координат

нагружения испытываемой машины, а также устойчивую работу системы при широкой вариации динамических параметров. Оказалось, что для обеспечения по каналу скорости статизма в 3 % и одновременного снижения колебательности системы до допустимого уровня при ослаблении поля (наброс тока якоря) наиболее простым является одновременное воздействие по каналу тока и каналу скорости. Такой подход дает возможность при слабой обратной связи по скорости снять противоречие между статизмом и перерегулированием в системе.

На рис. 2 представлены кривые переходного процесса тока якоря при ослаблении поля испытываемого двигателя ПЭ 174-7 мощностью 1600 кВт в системе с независимыми каналами регулирования скорости и тока (кривая 1) и в системе с одновременным воздействием на оба канала при задании тока якоря (кривая 2). Видно, что во втором варианте в системе обеспечивается удовлетворительное качество переходного процесса. Для обеспечения апериодического характера переходного процесса необходимо на входе канала задания тока якоря устанавливать задатчик интенсивности (кривая 3).

На рис. 3 представлены экспериментально снятые статические электро-механические характеристики испытываемой машины МПЭ 450-900 с номинальным

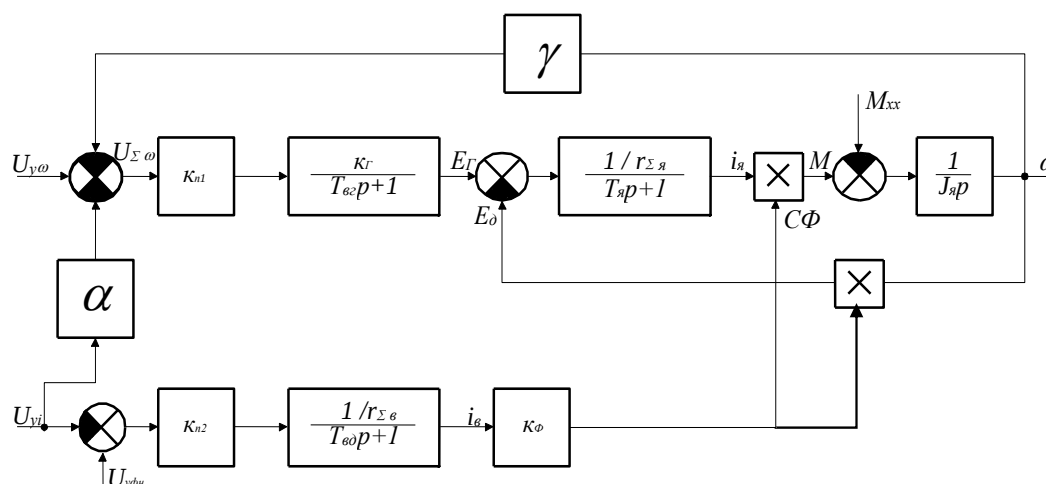


Рис. 1. Структурная схема двухканальной системы регулирования
Fig. 1. Block diagram of a two-channel control system

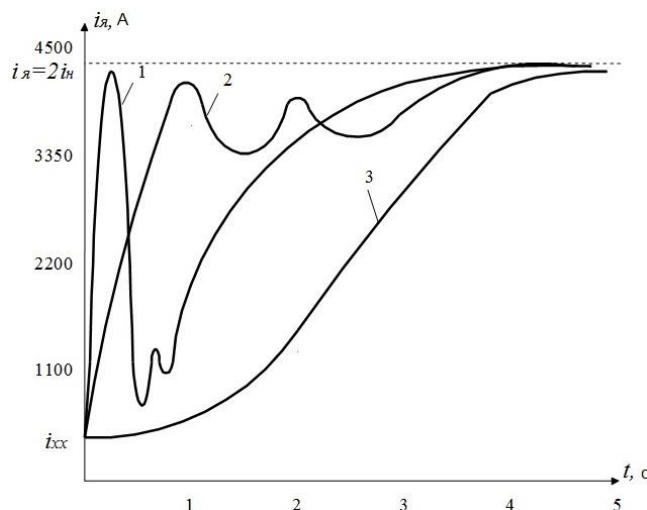


Рис. 2. Переходные процессы тока якоря при различных вариантах управления
Fig. 2. Transients of the armature current for different control options

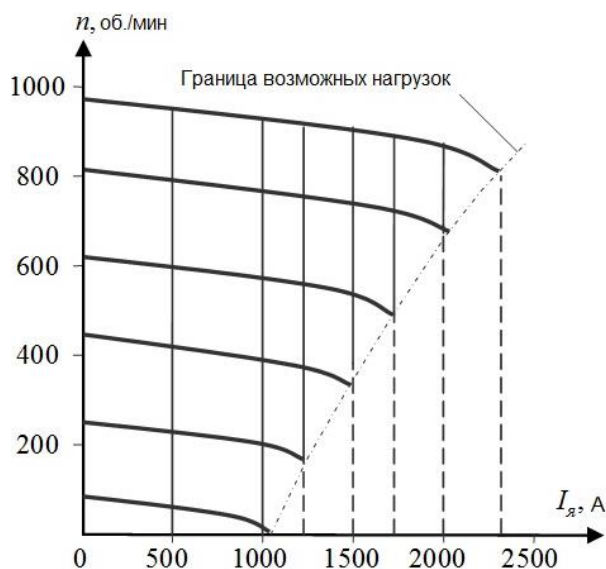


Рис. 3. Электромеханические характеристики испытуемой машины
Fig. 3. Electromechanical characteristics of the test machine

током, равным 1090 А, при различной частоте вращения с нанесенной границей возможных токовых нагрузок. Видно, что токовое нагружение до $2I_{ном}$ можно реализовать в пределах от $n_{ном}$ до $0,5n_{ном}$. При $n < 0,5n_{ном}$ предельный ток нагружения снижается. Если $n < 0,2n_{ном}$, то ток нагружения оказывается меньше номинального. Заданный ток в пределах допустимых и возможных поддерживается практически постоянным за счет астатического регулирования. Возможный диапазон нагружения при регулировании частоты вращения вполне достаточен для объективной оценки качества ремонта машин.

Процесс статического токового нагружения имеет незначительный колебательный характер, обусловленный нелинейностью объекта и спецификой управления. Характер переходных процессов тока и скорости в относительных единицах представлен на рис. 4.

Обсуждение результатов

Проведенное моделирование и комплекс натурных исследований стенда, как в статике, так и в динамике, позволил определить настроечные параметры, обеспечивающие устойчивость системы при различных по мощности испытуемых машин без дополнительных подстроек. Процесс статического токового

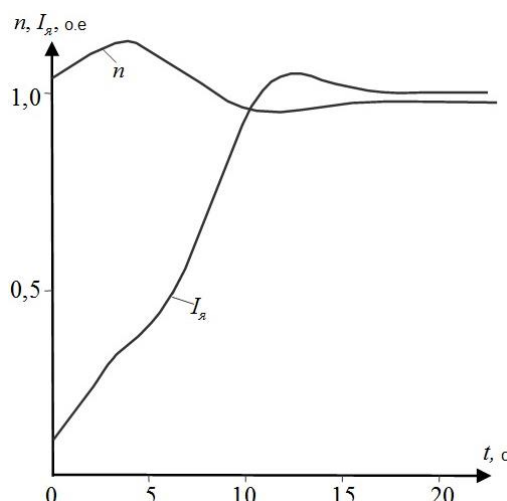


Рис. 4. Динамические характеристики испытуемой машины
Fig. 4. Dynamic characteristics of the test machine

нагружения имеет незначительный колебательный характер, обусловленный нелинейностью объекта и спецификой управления. Возможные аварийные режимы, возникающие при испытаниях, исследовались в работе [17], также были проведены натурные испытания с применением портативного цифрового микровизора [18]. Исследование электромеханических процессов статического нагружения электрических машин постоянного тока показало, что предложенный метод испытаний может применяться на практике.

Заключение

Таким образом, исследования разработанной системы управления электроприводом испытательного стенда показали, что система работоспособна и позволяет проводить испытания электрических машин постоянного тока в полном объеме без механического агрегирования с другими нагрузочными машинами.

Стенд смонтирован и эксплуатируется на ООО «Рудоремонтный завод» г. Черемхово, он позволяет проводить испытания машин мощностью до 2500 кВт.

Библиографический список

1. Махно Д.Е., Красноштанов С.Ю., Ишков А.М., Видулов М.А. Технология и техника горных предприятий Севера: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 216 с.
2. Kuznetsov N.K., Makhno D.E., Iov I.A. Damping elastic oscillations of digging mechanism // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 2. P. 022011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022011>
3. Кузнецов Н.К., Иов И.А., Иов А.А. Разработка электромеханической модели механизма тяги шагающего экскаватора // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 53–66. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-53-66>
4. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Investigation of dynamics of excavator digging mechanism with additional drive // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. Iss. 3. P. 032014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/3/032014>
5. Broido V.L., Krasnoshtanov S.U. Improvement of operation stability of crucial parts and constructions when repairing dredges and other mining machines exploited in conditions of North // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Iss. 3. P. 032012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032012>
6. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.
7. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
8. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. М.: Недра, 1992. 235 с.
9. Вайнер А.И., Буртовой В.А., Ткаченко Г.И., Мохнатый А.В., Хижняк В.Я. Стенд для послеремонтных испытаний электрических машин постоянного тока методом динамического



нагрузки // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 5. С. 107–111.

10. Пат. № 2133044, Российская Федерация, МКИ G 01 R 31/34, Т 21 С 31/04. Способ испытания электрической машины постоянного тока и устройство для его осуществления / С.С. Леоненко, А.В. Сорокин, Е.В. Чудогашев, А.С. Леоненко, Е.А. Дмитриев. Заявл. 23.03.1998; опубл. 10.07.1998. Бюл. № 19.

11. Леоненко С.С. Двухканальная система управления электроприводом испытательного стенда крупных электрических машин постоянного тока // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2000. № 2. С. 136–140.

12. Леоненко С.С., Леоненко А.С. Способ статического и динамического нагружения электрических машин постоянного тока при послеремонтных испытаниях // *Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: материалы IV Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу*. Ч. 1. Магнитогорск, 2004. С. 169–171.

13. Сорокин А.В. Моделирование систем управления автоматизированного электропривода // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2000. № 4. С. 13–17.

14. Сорокин А.В., Леоненко А.С. Система

управления испытательного стенда тяговых двигателей постоянного тока // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2012. № 6 (65). С. 133–137.

15. Сорокин А.В. Система управления электропривода испытательного стенда машин постоянного тока // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч.* Т. 1. Иркутск, 2018. С. 42–45.

16. Сорокин А.В. Испытательный стенд машин постоянного тока // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч.* Т. 1. Иркутск, 2019. С. 77–82.

17. Сорокин А.В., Леоненко А.С. Исследование аварийных режимов испытательного стенда тяговых двигателей постоянного тока // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6 (77). С. 41–44.

18. Пат. № 167811, Российская Федерация, МПК G02B 21/06. Портативный цифровой микровизор / Е.О. Гурков, А.Н. Шевченко, С.Ю. Красноштанов, М.В. Корняков. Заявл. 28.04.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.

References

1. Makhno DE, Krasnoshtanov SYu, Ishkov AM, Vikulov MA. *Technology and equipment of the mining enterprises in the North of Russia*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015. 216 p. (In Russ.)

2. Kuznetsov NK, Makhno DE, Iov IA. Damping elastic oscillations of digging mechanism. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(2):022011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022011>

3. Kuznetsov NK, Iov IA, Iov AA. Developing electromechanical model of walking dragline traction mechanism. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(11):53–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-53-66>

4. Kuznetsov NK, Iov IA, Iov AA. Investigation of dynamics of excavator digging mechanism with additional drive. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2018;194(3):032014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/3/032014>

5. Broido VL, Krasnoshtanov SU. Improvement of operation stability of crucial parts and constructions when repairing dredges and other mining machines exploited in conditions of North. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(3):032012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032012>

6. Zherve GK. *Industrial testing of electrical*

machines. Leningrad: Energoatomizdat; 1984. 408 p. (In Russ.)

7. Kovarskii EM, Yanko Yul. *Testing of electrical machines*. Moscow: Energoatomizdat; 1990. 320 p. (In Russ.)

8. Rod'kin DI. *Systems of dynamic loading and diagnostics of electric motors during after-repair tests*. Moscow: Nedra; 1992. 235 p. (In Russ.)

9. Vainer AI, Burtovoi VA, Tkachenko GI, Mokhnaty AV, Khizhnyak VYa. Post-repair test stand for direct-current electric machines by the method of dynamic loading. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2013;5:107–111. (In Russ.)

10. Leonenko SS, Sorokin AV, Chudogashev EV, Leonenko AS, Dmitriev EA. *A method of testing DC electric machines and a device for its implementation*. Patent RF, no. 2133044; 1998. (In Russ.)

11. Leonenko SS. Two-channel control system of a test stand drive for large DC electric machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2000;2:136–140. (In Russ.)

12. Leonenko SS, Leonenko AS. A method for static and dynamic loading of direct current electric machines during after-repair tests. In: *Avtomatizirovannyi elektroprivod v XXI veke: puti razvitiya: materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* = Automated Electric Drive in the 21st Century: development prospects: The 4th International Conference on automated



electric drives. Part 1. Magnitogorsk; 2004. p.169–171. (In Russ.)

13. Sorokin AV. Simulation of a control system for the automated electric drive. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2000;4:13–17. (In Russ.)

14. Sorokin AV, Leonenko AS. Test bed control system for DC traction motors. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2012;6:133–137. (In Russ.)

15. Sorokin AV. Control system for DC machines' electric drive test stand. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* = Enhancing the efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with the

international participation. Vol. 1. Irkutsk; 2018. p.42–45. (In Russ.)

16. Sorokin AV. Test stand for DC machines. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* = Enhancing the efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with the international participation. Vol. 1. Irkutsk; 2019. T. 1. p.77–82. (In Russ.)

17. Sorokin AV, Leonenko AS. Studying DC traction motor test bed emergency modes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;6:41–44. (In Russ.)

18. Gurkov EO, Shevchenko AN, Krasnoshtanov SYu, Korniyakov MV. *Portable digital microscanner*. Patent RF, no. 167811; 2017. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Сорокин А.В. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Alexander V. Sorokin is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторе / Information about the author



Сорокин Александр Васильевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: sorokinav@bgu.ru
Alexander V. Sorokin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: sorokinav@bgu.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.1:612.8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-111-120>

Применение тактильной сенсорной системы при сбойке встречных горных выработок

© Ю.Г. Скурихин^a, Д.С. Васильев^b

^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: В настоящее время проблема проведения горных выработок при их сбойке заключается в том, что после проходки они часто совпадают в пределах проектных контуров выработок, что приводит к неоправданным затратам, снижению безопасности и экологичности. Инструментальные методы не решают полностью задачи по качественному определению направления проходки встречных горных выработок при их сбойке, снижают безопасность работ, а также увеличивают затраты на ликвидацию результатов некачественной сбойки. Для совершенствования способа сбойки необходимо дополнение к существующей технологии или новая технология, включающая значительное повышение точности определения направления сбойки горных выработок. Цель данного исследования заключалась в разработке новой технологии определения направления проведения встречных выработок в процессе их сбойки при помощи тактильной сенсорной системы человека. Данная технология реализуется путем сравнения степени воздействия вибрации поверхности массива горных пород в различных точках забоя на ладонь руки. Вибрацию создают бурением шпура, а измеряют ее посредством приложения ладони руки к забою. Предложенная технология может способствовать повышению точности проходки, усилению безопасности, снижению затрат на проведение встречных горных выработок посредством уменьшения величины отклонения от заданного направления при сбойке выработок, увеличению объема добычи полезного ископаемого. Данная технология может использоваться при проведении встречных горных выработок при их сбойке в рудных и россыпных шахтах.

Ключевые слова: шахта, встречные выработки, сбойка горных выработок, проходка, тактильная сенсорная система, безопасность, затраты, полезное ископаемое, вибрация

Информация о статье: Дата поступления 13 января 2020 г.; дата принятия к печати 14 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Скурихин Ю.Г., Васильев Д.С. Применение тактильной сенсорной системы при сбойке встречных горных выработок. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 111–120. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-111-120>

The use of a tactile sensory system in connecting counter workings

© Yuri G. Skurikhin^a, Denis S. Vasilyev^b

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: At present, the problem of advancing mine workings when connecting them is that after advancing, the workings often coincide within the project workings' contours, which causes a significant increase of the costs, diminishes the safety and creates ecological issues. The instrumental methods cannot provide quality determination of the workings advance direction when connecting the workings, thus the work safety deteriorates, and the cost of eliminating the consequences of the non-quality connection increases. To improve the ways of connecting the workings, either the existing technology should be modified or a new technology is needed. The purpose of the study is to develop a new technology for determining the direction of the counter workings when connecting the workings. The technology involves a tactile sensory system of man and is realized by the comparison of the degree of the rock surface vibration effect on a human palm at different points of the face. The vibration is created by drilling a blast-hole, and it is measured by applying the palm to the face. The suggested technology can enhance the advance exactness and safety, as well as increase the mineral output and reduce the costs of advancing the counter mine workings due to the decrease in the deviation from the target direction when connecting the workings. The technology can be used when advancing counter mine workings and connecting the workings in ore and alluvial mines.

Keywords: mine, counter workings, connection of mine workings, advancing, tactile sensory system, safety, costs, minerals, vibration



Information about the article: Received January 13, 2020; accepted for publication February 14, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Skurikhin YuG, Vasilyev DS. The use of a tactile sensory system in connecting counter workings. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):111–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-111-120>

Введение

Проблема проведения встречных горных выработок при их сбойке заключается в том, что после проходки они часто не совпадают в пределах проектных контуров этих выработок. Это приводит к неоправданным затратам, снижению безопасности и экологичности работ.

На данный момент известно несколько инструментальных методов определения направления проходки встречных горных выработок. Известен способ проведения встречных выработок при их сбойке с применением компаса [1]. Способ включает определение направления проведения встречных выработок при их сбойке с применением горного компаса, бурение, зарядание, взрывание шпуров, проветривание и уборку взорванного массива горной породы из забоя. С помощью рулетки и горного компаса определяют азимуты направления проведения встречных выработок. Все результаты отображают на миллиметровке с помощью циркуля и транспорта. После этого производят привязку к горной местности. Направление устанавливают просвечиванием шахтерской лампой призабойного пространства по одной линии, соединяющей два отвеса. Отвес представляет собой груз с гибкой нитью, прикрепленной к кровле выработки. При использовании данного инструментального метода происходит отклонение от направления проведения встречных выработок при их сбойке ввиду неточностей измерений и расчетов при реализации этого метода. В итоге увеличиваются затраты на ликвидацию результатов сбойки встречных выработок. Также известен способ проведения встречных горных выработок при их сбойке [2], включающий теодолит с лазерным указателем, последующее бурение, зарядание и взрывание шпуров,

проветривание и уборку взорванного массива горной породы из забоя. Направление проведения встречных горных выработок по маркшейдерским точкам направляют с отвесами. Для этого призабойное пространство просвечивают шахтерской лампой по линии, соединяющей два отвеса. Недостатками этого способа являются значительные затраты на ликвидацию результатов отклонения сбойки от заданного направления, снижение безопасности и экологичности работ из-за неточностей измерений и расчетов данного инструментального метода.

К сожалению, инструментальные методы не решают полностью задачи по качественному определению направления проходки встречных горных выработок при их сбойке, при этом снижая безопасность и экологичность работ, а также увеличивая затраты на ликвидацию результатов некачественной сбойки. Для совершенствования существующего способа сбойки необходимо дополнение к существующей технологии или новая технология, включающая значительное повышение точности определения направления сбойки горных выработок. Таким решением является использование в процессе сбойки встречных горных выработок тактильной сенсорной системы [2].

Сенсорная система – это совокупность структур нервной системы, воспринимающих сигналы из окружающей и внутренней среды. Она включает в числе прочих воспринимающих систем организма слуховую, осязательную и тактильную системы. Это также совокупность органов чувств организма, реагирующих на внешние раздражители, и совокупность ощущений, полученных организмом от внешних раздражителей. В сенсорную систему входят различные рецепторы, среди которых в числе прочих выделяют



механорецепторы (кожа, мышцы, сухожилия, суставы) и терморецепторы (кожа). Тактильная же чувствительность человека – это ощущение при воздействии на кожную поверхность разных механических стимулов. Тактильная сенсорная система является частью кожной сенсорной системы – она обеспечивает ощущения прикосновения, давления, вибрации, температуры, контакта с кожей. На коже имеются разнообразные рецепторы, реагирующие на физические и механические раздражители, в частности тактильная, температурная и болевая рецепция. На 1 см² кожи в среднем приходится 12–13 холодовых, 1–2 тепловых, 25 тактильных и около 100 болевых точек, особенно много их на пальцах рук и ног, ладонях. Это механорецепторы, реагирующие на растяжение, давление и вибрацию. Наиболее чувствительный рецептор реагирует на малейшие изменения показателей вплоть до долей миллиметра (0,0001 мм) [3–10].

Таким образом, известная из медицинских исследований информация о наличии на пальцах рук и ладонях механорецепторов, реагирующих на давление и вибрацию, создает предпосылки для возможности использования этих знаний в разных областях, в частности возможно их использование для определения величины физического воздействия на поверхность горной породы забоя встречной выработки с различием частоты и амплитуды вибрации.

Методы исследования

Прикладыванием ладони руки к поверхности забоя, противоположного от проходимой встречной выработки, определяется местоположение буримого шпура противоположной выработки. При этом отмечается, что частота и амплитуда вибрации меняются в соответствии с изменением расстояния от ладони руки до шпура. Наибольшие значения величин частоты и амплитуды вибрации соответствуют наименьшему расстоянию до шпура. При бурении шпура в центре забоя встречной выработки перфоратором

буровая коронка производит 2100–3000 ударов в минуту по массиву горных пород, вызывая колебания с частотой вибрации 35–50 Гц и амплитудой 0,4–0,15 мм [11–14].

При перемещении места бурения шпура по забою встречной проходимой выработки при ее сбойке, а также места прижатия ладони руки к поверхности забоя противоположной выработки изменяются такие показатели, как частота вибрации поверхности массива пород и ее амплитуда. Если ладонь руки приложена к центру поверхности забоя выработки, встречной противоположной выработке, а частота и амплитуда, воздействующие на ладонь руки, являются максимальными, то при перемещении ладони руки по горизонтали вправо или влево рассматриваемые показатели уменьшаются. При этом шпур находится в центре проходимой встречной выработки при ее сбойке, а выработка, встречная противоположной проходимой выработке, проводится в направлении, совпадающем с направлением проходимой встречной выработки при ее сбойке (рис. 1). Если в случае нахождения шпура в центре проходимой выработки наибольшие значения частоты и амплитуды фиксируются на поверхности породы правой половины забоя встречной противоположной проходимой выработки, то встречная противоположная проходимая выработка при ее сбойке отклонилась от заданного направления вправо. Для сбояки в заданном направлении встречную проходимую выработку необходимо повернуть влево (рис. 2, 3). Если же наибольшие значения частоты и амплитуды фиксируются на поверхности породы левой половины забоя встречной противоположной проходимой выработки, то встречная противоположная проходимая выработка при ее сбойке отклонилась от заданного направления влево. Для сбояки в заданном направлении встречную проходимую выработку необходимо повернуть вправо.

Способ проведения встречных выработок при их сбойке осуществляется

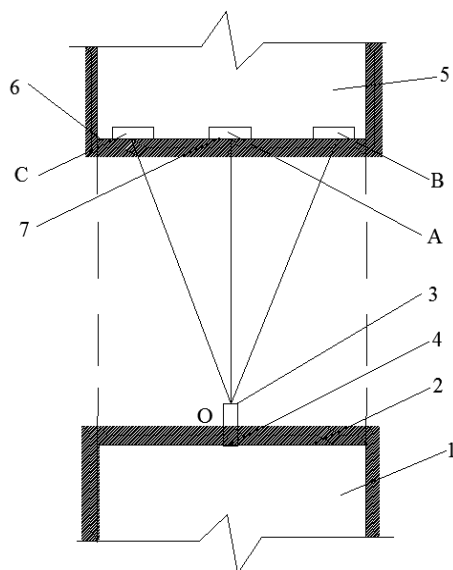


Рис. 1. Способ определения направления проведения встречных выработок при их сбойке с минимальным отклонением их от заданного направления:

- 1 – встречная выработка; 2 – забой встречной выработки; 3 – шпур в центре встречной выработки;
4 – центр забоя встречной выработки; 5 – противоположная встречная выработка;
6 – забой противоположной встречной выработки;
7 – центр забоя противоположной встречной выработки

A, B, C – места прикладывания ладони руки к поверхности массива пород забоя

Fig. 1. A method for determining the direction of advancing counter workings when connecting them with a minimum deviation from the target direction:

- 1 – counter working; 2 – the face of the counter working; 3 – hole in the center of the counter working;
4 – the center of the face of the counter working; 5 – opposite counter working;
6 – the face of the opposite counter working;
7 – the center of the face of the opposite counter working

A, B, C – places where the palm of the hand is applied to the surface of the face rock mass

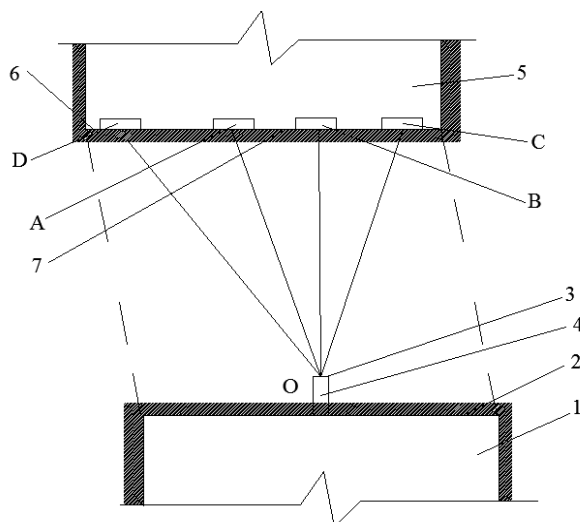


Рис. 2. Способ определения направления проведения встречных выработок при их сбойке с отклонением их от заданного направления на величину, не превышающую половины ширины встречных выработок

Условные обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 2. A method for determining the direction of counter workings when connecting them with their deviation from the given direction not exceeding half the width of the counter workings

Notational conventions are same as in in Fig.1

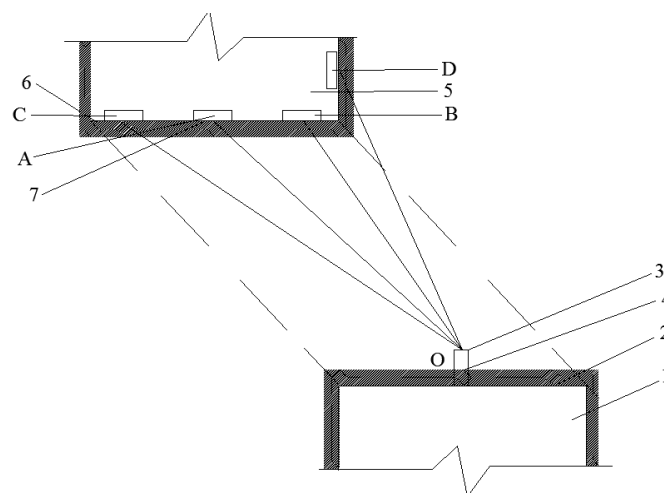


Рис. 3. Способ определения направления проведения встречных выработок при их сбойке с отклонением их от заданного направления на величину, превышающую половину ширины встречных выработок

Условные обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 3. A method for determining the direction of counter workings when connecting them with a deviation from the target direction exceeding half the width of the counter workings

Notational conventions are same as in in Fig.1

следующим образом. При проведении встречной выработки 1 (см. рис. 1) в забое 2 этой выработки бурят шпур 3. Шпур располагают в центре 4 забоя 2 этой встречной выработки 1. В противоположной встречной выработке 5 к поверхности массива горной породы забоя 6 этой выработки прикладывают ладонь руки. Ладонь руки прикладывается не менее, чем в трех точках А, В, С, в том числе в центре забоя 6. Степень воздействия вибрации на ладонь руки сравнивают в точках А, В и С. При взаимном расположении встречных выработок 1, 2, показанных на рис. 1, наибольшая вибрация ощущается ладонью руки в центре 7 забоя 6 противоположной встречной выработки 5. В точках В и С вибрация, ощущаемая ладонью руки, меньше, чем в точке А – центре 7 забоя 6 противоположной встречной выработки 5. При этом другие точки – В и С – расположены на равных между собой расстояниях до центра 7 забоя 6. Кроме того, вибрация поверхности массива горной породы в точках В и С, ощущаемая ладонью руки, одинакова. Равенство расстояний от точки А (центра 7 забоя 6) до точек В и С, а также равенство степени воздействия вибрации, ощущаемой ладонью руки в этих точках (В и С),

показывает, что встречная выработка 1 и противоположная встречная выработка 5 проводятся без отклонений от заданного направления. Это подтверждается графическим определением направления проведения встречных выработок. Для этого проводят полуокружность с центром в точке А. Радиус полуокружности равен длине отрезка АВ. Через середину полуокружности и точку А проводят прямую линию. Эта прямая линия является направлением проведения встречной выработки 1 при ее сбойке с противоположной встречной выработкой 5. При проведении встречных выработок 1, 5 каждый цикл проходки сопровождается определением степени воздействия вибрации поверхности массива горных пород в центре и в других точках забоя на ладонь руки. При необходимости направления встречной выработки 1 и противоположной встречной выработки 5 корректируются. В результате устанавливают, что встречная 1 и противоположная встречной 5 выработки проводятся без отклонения от заданного направления, а их сбойка будет выполнена без дополнительных затрат. Для проведения встречных выработок при их сбойке без отклонения от заданного направления



необходимо, чтобы степень воздействия вибрации на ладонь руки в центре забоя противоположной встречной выработки превышала степень воздействия вибрации на ладонь в других точках.

На рис. 2 показано взаимное расположение встречной и противоположной встречной выработок при их сбойке с отклонением от заданного направления на величину, не превышающую половины ширины встречной выработки. В центре 4 забоя 2 встречной выработки 1 бурят шпур 3. В забое 6 противоположной встречной выработки 5 определяют степень воздействия вибрации поверхности массива горной породы прикладыванием ладони руки в точках А, В, С и D, расположенных по ширине забоя выработки 5. Степень воздействия вибрации на ладонь руки следующая. В точке В – больше, чем в точках А, С; в точке А – больше, чем в точке D. Наибольшая степень вибрации – в точке В. В результате устанавливают, что забой 6 противоположной встречной выработки 5 смещен относительно забоя 2 встречной выработки 1, а встречную выработку проводят с отклонением от заданного направления на расстояние, равное отрезку АВ. Проводится полуокружность с центром в точке В и радиусом, равным расстоянию АВ. Принимают, что отклонение встречной выработки 1 от заданного направления составляет АВ. Определяют новое направление проведения встречной выработки 1 с учетом отклонения АВ. Разделяют отклонение АВ на участки, равные участкам смещения забоя 2 встречной выработки 1 при ее проведении по новому направлению. Количество участков отклонения принимают равным количеству участков смещения. При этом суммарная длина участков отклонения должна быть равной суммарной длине участков смещения. В результате встречная выработка 1 выходит при сбойке в точку А (центр 7 встречной выработки 5) или на заданное направление. При выполнении каждого цикла проходки встречной выработки 1 и противоположной

встречной выработки 5 определяют степень воздействия вибрации поверхности массива горных пород в центре и других точках забоя на ладонь руки. При необходимости направление проведения встречных выработок корректируется. Поэтому для сбойки встречной выработки 1 с противоположной встречной выработкой 5 необходимо изменить направления их проведения с учетом отклонения на расстояние, равное АВ. В процессе встречных выработок 1, 5 уменьшается расстояние, равное АВ (между центром 7 забоя 6 противоположной встречной выработки 5 и точкой В, в которой происходит наибольшее воздействие вибрации на ладонь руки). Это расстояние при сбойке встречных выработок будет равным нулю.

На рис. 3 показано взаимное расположение встречной и противоположной встречной выработок при их сбойке с отклонением от заданного направления на величину, превышающую половину ширины встречных выработок. В центре 4 забоя 2 встречной выработки 1 бурят шпур 3. В забое 6 противоположной встречной выработки 5 определяют степень воздействия вибрации поверхности массива горной породы на ладонь руки прикладыванием ладони руки в точках А, В, С и D. Степень воздействия вибрации на ладонь руки следующая. В точке В – больше, чем в точках А, D, в точке А – больше, чем в точке С. Наибольшая степень вибрации – в точке В. В результате устанавливают, что забой 6 противоположной встречной выработки 5 смещен относительно забоя 2 встречной выработки 1, а встречные выработки проводят с отклонением от заданного направления на величину, превышающую половину ширины встречных выработок. Для определения направления сбойки встречных выработок принимают равными между собой расстояния АВ и BD при равной степени воздействия вибрации на ладонь руки в точках А, D. Проводят полуокружность с центром в точке В и радиусом, равным длине отрезка АВ или BD. Через



середину полуокружности и точку В проводят прямую линию, определяют направление проведения встречной выработки 1. Новое направление проведения этой выработки принимают с учетом отклонения на длину отрезка АВ. При этом при проведении встречной выработки 1 по новому направлению забой 2 смещают на отклонение – длину отрезка АВ. При выполнении каждого цикла проходки встречной выработки 1 и противоположной встречной выработки 5 определяют степень воздействия вибрации поверхности массива горных пород в центре и других точках забоя на ладонь руки. При необходимости направления проведения встречных выработок при их сбойке корректируются [15, 16].

Результаты исследования

Предлагаемый способ проведения встречных горных выработок при их сбойке апробирован в условиях рудника им. Матросова, расположенного в Магаданской области. Испытывались схемы при взаимном расположении встречных выработок, показанные на рис. 1–3, а также схемы со значительным отклонением от заданного направления – более 2 м. По всем схемам получены положительные результаты. При этом сохранились все требования правил безопасности при ведении взрывных работ в процессе сбойки встречных выработок, предусмотренные основными источниками¹ [17]. Так, при отбойке запасов крутопадающей рудной зоны 13 мощностью 2,5–3 м выемочного блока 26 гор. 790 м 2/3 флангового восстающего было пройдено по высоте по рудной зоне, а оставшая часть проходила по породе с наклоном в сторону лежачего бока для сбойки со штреком гор. 830 м. При проведении ходка между очистной камерой и восстающим произошло отклонение от заданного направления. Определение величины этого смещения с приме-

нием тактильной сенсорной системы и фактической сбойки встречных горных выработок показало, что отклонение составило 3 м.

Технология проходки верхнего ходка была следующей. Из восстающего до очистной камеры через междукammerный целик шириной 3 м проходил нижний ходок. Из места его сбойки с очистной камерой по крутопадающей рудной зоне выполнена проходка опережающего восстающего высотой 6 м, а из его тупика по породе до восстающего с лежачей его стороны прошли верхний ходок. Однако сбойки верхнего ходка с восстающим не произошло. Верхний ходок прошли на расстоянии 3 м от восстающего.

При попытке определить местоположение забоя верхнего ходка использовали сенсорную систему, включающую звуковой рецептор. При этом во время нахождения в восстающем примерно на высоте забоя верхнего ходка создавалось впечатление, что забой верхнего ходка размещался, распространяясь по всему периметру поперечного сечения восстающего. Определить расположение забоя однозначно в каком-либо одном месте периметра поперечного сечения восстающего невозможно, так как сила звука во всех направлениях поперечного сечения восстающего была одинаковой. Прикладывание ладони руки в разных местах по периметру поперечного сечения восстающего показало различную степень воздействия вибрации породы стенок восстающего на поверхность кожи ладони руки. Наблюдалась закономерность в изменении интенсивности вибрации: постепенное увеличение или уменьшение ее интенсивности по мере перемещения ладони. Нетрудно было установить наибольшую величину интенсивности вибрации, а следовательно, место бурения в забое верхнего ходка и сам забой. Установлено, что для сбойки забой

¹ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах»: приказ Федер. службы по экологич., технологич. и атом. надзору № 605 от 16.12.2013 г. с изм. и доп. от 30.11.2017 г. // Гарант. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70628432/> (10.01.2020).



необходимо развернуть на 90°. После трех циклов проходки произошла сбойка.

Заключение

Описанная технология рекомендуется к внедрению. В ходе ее использования снижаются затраты на проведение встречных выработок при их сбойке вследствие не только уменьшения отклонения от заданного направления, но и сокращения времени их проходки.

Это подтверждается уменьшением простоев при отработке крутопадающих рудных зон, обусловленным повышением качества проведения проходческих и нарезных выработок при их сбойке, а также при ведении очистных работ в подземных условиях рудных и россыпных месторождений с положительной и отрицательной температурой пород.

Библиографический список

1. Brink A. Research on prediction of rock bursts at Western Deep // *Levels Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1983. Vol. I. P. 1–10.
2. Coates D.F., Ignatieff A. Predictions and measurement of pillar stresses // *Canada Mining Journal*. 1966. Vol. 87. No. 1. P. 50–56.
3. Abraira V.E., Ginty D.D. The sensory neurons of touch // *Neuron*. 2013. Vol. 79. Iss. 4. P. 618–639. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.051>
4. Ackerley R., Backlund Wasling H., Liljencrantz J., Olausson H., Johnson R.D., Wessberg J. Human C-tactile afferents are tuned to the temperature of a skin-stroking caress // *Journal of Neuroscience*. 2014. Vol. 34. Iss. 8. P. 2879–2883. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2847-13.2014>
5. Alexander R.D. The biology of moral systems. New York: Aldine de Gruyter, 1987. 301 p.
6. Bessou P., Burgess P.R., Perl E.R., Taylor C.B. Dynamic properties of mechanoreceptors with unmyelinated (C) fibers // *Journal of Neurophysiology*. 1971. Vol. 34. Iss. 1. P. 116–131. <https://doi.org/10.1152/jn.1971.34.1.116>
7. Cochrane N. Physical contact experience and depression // *Acta Psychiatrica Scandinavica Supplementum*. 1990. Vol. 357. P. 1–91.
8. Cole J., Bushnell M.C., McGlone F., Elam M., Lamarre Y., Valbo A., et al. Unmyelinated tactile afferents underpin detection of low-force monofilaments // *Muscle & Nerve*. 2006. Vol. 34. P. 105–107. <https://doi.org/10.1002/mus.20534>
9. Gordon I., Voos A.C., Bennett R.H., Bolling D.Z., Pelphrey K.A., Kaiser M.D. Brain mechanisms for processing affective touch // *Human Brain Mapping*. 2011. Vol. 34. Iss. 4. P. 914–922. <https://doi.org/10.1002/hbm.21480>
10. Sugiura Y. Spinal organization of C-fiber

afferents related with nociception or non-nociception // *Progress in Brain Research*. 1996. Vol. 113. P. 320–339.

11. Стариков А.П., Снижко В.Д. Передовой производственный опыт скоростного проведения горных выработок на шахте «Заречная» в Кузбассе // *Уголь*. 2008. № 11. С. 3–6.

12. Оверченко М.Н., Мозер С.П., Галушко Ф.И., Луньков А.Г. Развитие схем контурного взрывания для проходки подземных горных выработок // *Взрывное дело*. 2016. № 115/72. С. 202–213.

13. Доильницын В.М., Зерщиков С.Г., Ляшенко В.А. Испытания зарядов мягкого взрывания на рудниках ОАО «Апатит» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 55. С. 74–81.

14. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е. Повышение эффективности буровзрывной отбойки руды в зажатой среде // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 11. С. 59–72.

15. Павлов А.М., Васильев Д.С. Повышение эффективности подземной разработки тонких крутопадающих жил // *Горная промышленность*. 2017. № 1 (131). С. 86–87.

16. Vasilyev D.S., Pavlov A.M. Justification of underground gold placer development parameters for the Konevinsky deposit // *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 408. Iss. 1. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012042>

17. Пат. № 2527955, Российская Федерация, МПК E21D9/00 E21B7/04. Способ проведения встречных выработок при их сбойке / Ю.Г. Скурихин, В.А. Романенко. Заявл. 03.07.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.

References

1. Brink A. Research on prediction of rock bursts at Western Deep. *Levels Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1983;1:1–10.
2. Coates DF, Ignatieff A. Predictions and measurement of pillar stresses. *Canada Mining Journal*. 1966;87(1):50–56.

3. Abraira VE, Ginty DD. The sensory neurons of touch. *Neuron*. 2013;79(4):618–639. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.051>

4. Ackerley R, Backlund Wasling H, Liljencrantz J, Olausson H, Johnson RD, Wessberg J. Human C-tactile afferents are tuned to the temperature of a skin-stroking caress.



Journal of Neuroscience. 2014;34(8):2879–2883.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2847-13.2014>

5. Alexander R.D. *The biology of moral systems*. New York: Aldine de Gruyter; 1987. 301 p.

6. Bessou P, Burgess PR, Perl ER, Taylor CB. Dynamic properties of mechanoreceptors with unmyelinated (C) fibers. *Journal of Neurophysiology*. 1971;34(1):116–131.
<https://doi.org/10.1152/jn.1971.34.1.116>

7. Cochrane N. Physical contact experience and depression. *Acta Psychiatrica Scandinavica Supplementum*. 1990;357:1–91.

8. Cole J, Bushnell MC, McGlone F, Elam M, Lamarre Y, Vallbo A, et al. Unmyelinated tactile afferents underpin detection of low-force monofilaments. *Muscle & Nerve*. 2006;34:105–107.
<https://doi.org/10.1002/mus.20534>

9. Gordon I, Voos AC, Bennett RH, Bolling DZ, Pelphey KA, Kaiser MD. Brain mechanisms for processing affective touch. *Human Brain Mapping*. 2011;34(4):914–922.
<https://doi.org/10.1002/hbm.21480>

10. Sugiura Y. Spinal organization of C-fiber afferents related with nociception or non-nociception. *Progress in Brain Research*. 1996;113:320–339.

11. Starikov AP, Snizhko VD. Best industrial practices of speed advancing the mine workings at “Zarechnaya” mine. *Ugol*. 2008;11:3–6. (In Russ.)

12. Overchenko MN, Mozer SP, Galushko FI, Lun'kov AG. Development of contour blasting schemes for advancing underground mine workings. *Vzryvnoe delo = Explosion technology*. 2016;115/72:202–213. (In Russ.)

13. Doil'nitsyn VM, Zershchikov SG, Lyashenko VA. Testing mild blasting charges at the JSC “Apatite” mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2007;S5:74–81. (In Russ.)

14. Lyashenko VI, Khomenko OE. Enhancement of confined blasting of ore. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;11:59–72. (In Russ.)

15. Pavlov AM, Vasil'ev DS. Enhancing the efficiency of underground mining of steeply dipping fine veins. *Gornaya promyshlennost' = Mining Industry*. 2017;1:86–87. (In Russ.)

16. Vasilyev DS, Pavlov AM. Justification of underground gold placer development parameters for the Konevinsky deposit. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;408(1):012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012042>

17. Skurikhin YuG, Romanenko VA. A method of advancing counter workings when connecting them. Patent RF, no. 2527955; 2014. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Скурихин Ю.Г., Васильев Д.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Yuri G. Skurikhin, Denis S. Vasilyev are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

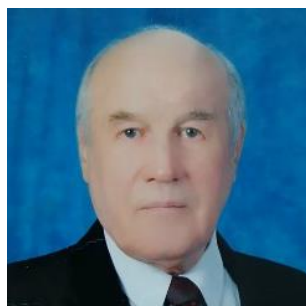
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Скурихин Юрий Георгиевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: go_gor@istu.edu

Yuri G. Skurikhin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Department of Mineral Deposit Development,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: go_gor@istu.edu

**Васильев Денис Сергеевич,**

младший научный сотрудник проектно-конструкторского бюро «Горняк»,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: denisvasilyew@yandex.ru

Denis S. Vasilyev,

Junior Researcher, Research & Development Bureau "Gornyak",
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: denisvasilyew@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 551.211

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-121-131>

Сравнительный анализ кайнозойского вулканизма Восточно-Китайского блока и Тункинской рифтовой зоны Байкальской рифтовой системы

© Р.М. Лобацкая^a, Л.И. Аузина^b, Юнчжань Чжан^c, М.А. Вантеева^d,
М.И. Сапрыкина^e, А.А. Семилет^f, Ю.Е. Гиренко^g

^{a,b,d-g}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^cНанкинский университет, г. Нанкин, Китай

Резюме: В процессе учебных практик в районах п. Аршан (Иркутская область, Россия) и г. Нанкин (Восточный Китай) были изучены некоторые вулканические структуры. Цель данного исследования заключалась в сборе полевого материала и последующем сравнительном анализе причин возникновения вулканических образований на исследуемых территориях. В статье дана геолого-тектоническая характеристика вулканической деятельности, описаны установленные причинно-следственные связи ее активизации и структурной приуроченности. В качестве методов использовались полевые исследования, анализ литературных и архивных материалов. Главным достижением исследований является определение глобальной причины, повлиявшей на вулканизм территорий. По мнению авторов, общность характеристик в значительной степени обусловлена последствиями Индо-Евразийской коллизии.

Ключевые слова: вулканизм, Тункинская впадина, Южно-Китайский блок, рифтогенез, субдукция, коллизия

Информация о статье: Дата поступления 18 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 23 января 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Лобацкая Р.М., Аузина Л.И., Чжан Юнчжань, Вантеева М.А., Сапрыкина М.И., Семилет А.А., Гиренко Ю.Е. Сравнительный анализ кайнозойского вулканизма Восточно-Китайского блока и Тункинской рифтовой зоны Байкальской рифтовой системы. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 121–131. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-121-131>

Comparative analysis of Cenozoic volcanism in the East China block and Tunkinsky rift zone of the Baikal rift system

© Raisa M. Lobatskaya^a, Larisa I. Auzina^b, Yongzhan Zhang^c, Marina A. Vanteeva^d,
Maria I. Saprykina^e, Andrey A. Semilet^f, Yuriy E. Girenko^g

^{a,b,d-g}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^cNanjing University, Nanjing, China

Abstract: A few volcanic structures have been investigated during the practical training programs in the area of Arshan (Irkutsk Region, Russia) and Nanjing (East China). The purpose of the study has been to collect the field material and perform a comparative analysis of the causes of the volcanic structure formation in the study areas. The volcanic activity has been characterized in geological and tectonic terms, and causal relationships between its intensification and structural confinedness have been defined. The research methods include field studies, as well as the analysis of literary and archive materials. The main achievement of the research is the determination of the global cause that influenced the volcanism of the territories. According to the authors, the commonality of the characteristics is to a large extent due to the consequences of the India-Eurasia collision.

Keywords: volcanism, Tunkinsky depression, South China block, rifting, subduction, collision

Information about the article: Received December 18, 2019; accepted for publication January 23, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Lobatskaya RM, Auzina LI, Zhang Yongzhan, Vanteeva MA, Saprykina MI, Semilet AA, Girenko YE. Comparative analysis of Cenozoic volcanism in the East China block and Tunkinsky rift zone of the Baikal rift system. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):121–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-121-131>



Введение

Самый молодой этап развития Земли начался 67 млн лет назад. В это время продолжалось активное формирование геологических структур, для которых характерен вулканизм. Прежде всего шло активное становление нового глобального плана границ литосферных плит, среди которых, как известно, выделяют три типа в зависимости от характера их движения относительно друг друга: конвергентные, дивергентные и трансформные границы. Для каждого из типов вулканизм является характерным процессом.

Предметом изучения в данной работе является вулканизм, проявленный в пределах двух типов границ: дивергентной – на территории Тункинской континентальной рифтовой впадины (Южная Сибирь, Россия), и конвергентной – на территории Южно-Китайского континентального блока (район Лухе, г. Нанкин, провинция Цзянсу, Восточный Китай).

Цель исследований заключалась в сборе полевого материала, последующем сравнительном анализе продуктов вулканизма и поисках общих глобальных причин их формирования.

Вулканизм Тункинской впадины

Байкальская рифтовая система (БРС) представляет собой крупную внутриконтинентальную дивергентную границу между Евразийской и Забайкальской литосферными плитами, осевая часть которой на протяжении 2500 км представлена рифтовыми впадинами и разломами, отделяющими впадины от блоковых поднятий плечей рифтовой системы. БРС входит в состав кайнозойских континентальных рифтов, представленных в Центральной Европе, Восточной Африке, Северной Америке и Азии. Все рифты связаны с механизмом растяжения литосферы, который может быть вызван как локальными, так и внешними региональными геодинамическими силами. БРС отличается от других систем развитием во внутренней части большого континента на значительном, до нескольких

тысяч километров, расстоянии от субдукционного поддвига Тихоокеанской плиты под Азиатский континент и зоны коллизионного столкновения Индийского субконтинента с Евразией. БРС – уникальное внутриплитное явление с геодинамической и тектонической точек зрения [1].

БРС включает 13 крупных котловин, отделенных друг от друга протяженными высокогорными хребтами и невысокими поперечными или диагональными перемычками. Эти котловины объединены в четыре рифтовых зоны: Муйскую, Байкальскую, Тункинскую и Хубсугульскую. Процессы на дивергентных границах подразделяют на несколько стадий: начального, затем зрелого рифтинга с сохранением континентальной литосферы под впадинами; начального и зрелого спрединга, сопровождающегося критическим утонением и разрывом континентальной литосферы и ее замещением океанической. Для БРС характерна стадия зрелого рифтинга.

Существует две модели Байкальского рифтинга:

- «активная», где основным источником энергии считается поток магмы, главенствующую роль играют глубинные термальные процессы, благодаря которым происходит плавление и утонение литосферы (подтверждение – аномалии Буге (Добрецов, 2001));

- «пассивная», в которой основная роль принадлежит латеральному движению литосферных плит (в данном случае Евразийской и Индо-Австралийской).

Большинство ученых рассматривают эти процессы как два последовательных самостоятельных этапа развития БРС [2].

Наиболее заметное проявление вулканизма происходило в Тункинской рифтовой зоне. Тункинский рифт протягивается с юго-западной оконечности Байкала на запад на 200 км и представляет собой чередование пяти межгорных впадин, заполненных кайнозойскими отложениями мощностью более 2,5 км и разделяющими впадины межвпадинными перемычками (рис. 1).

**Рис. 1. Тункинский рифт (Белоусов В.М., Будэ И.Ю., Радзиминович Я.Б., 2011):**

1 – котловины (I – Быстринская, II – Торская, III – Тункинская, IV – Хойтогольская, V – Туранская, VI – Мондинская); 2 – государственная граница; 3 – границы субъектов Российской Федерации

Fig. 1. Tunkinsky rift (Belousov V.M., Bude I.Y., Radsiminovich Y.B., 2011):

1 – basins (I – Bystrinskaya, II – Torskaya, III – Tunkinskaya, IV – Khoytogolskaya, V – Turanskaya, VI – Mondinskaya); 2 – state border, 3 – constituent territories of the Russian Federation

Проявление вулканизма Тункино-Мондинской группы впадин началось в позднем мелу – раннем палеогене. В Тункинском рифтовом сегменте вулканизм активизировался на протяжении нескольких этапов: 57–72, 24–36, 8–16 и менее 5 млн лет назад. Базальты и туфы ранних извержений вскрыты бурением в основании осадочно-вулканогенного разреза Тункинской впадины. Крупные трещины, по которым происходили излияния базальтов, формировались в миоцене – раннем плиоцене, в условиях медленного прогибания дна впадины и сопровождающих его асимметричных поднятий плечей рифта, представленных горными хребтами¹. В каждом временном интервале извержения начинались оливиновыми толеитами и завершались содержащими базанит лавовыми извержениями. В настоящее время здесь сохранилось более 15 доступных для изучения вулканических построек (рис. 2).

Вулканические структуры в Тункинской рифтовой зоне весьма разнообразны. Одна из наиболее крупных и хорошо изученных вулканических структур Тункинской котловины – это Хурай-Хобок, она сложена в основном туфами, туфобрекчиями с высоким содержанием марганца, хрома и железа, что обусловило

цветовую гамму вулканического материала (см. рис. 2). Среди вулканических образований отмечаются сохранившиеся вулканические бомбы размерами от 40 до 270 см.

Тункинская долина является типичным примером проявления стадии зрелого рифтинга. Пространственно вулканические образования расположены в пределах впадины, однако чаще всего пространственно же тяготеют к плечам Тункинского рифта. Известны, кроме того, проявления вулканизма в пределах межвпадинных перемычек [3]. Расположение вулканических структур связано с коровыми разломами, которые выполняли роль подводящих каналов для глубинного магматического вещества.

Вулканическая активность на территории Тункинской впадины протекала в четыре этапа (табл. 1). При этом характерно, что от начальных к финальным этапам вулканических последовательностей в Тункинской котловине содержание кремнезема снижалось, а щелочность возрастала. Кроме того, в позднекайнозойских базальтах были найдены глубинные включения. Основной структурообразующий и рельефообразующий разлом Тункинской рифтовой долины ограничивает ее северный крутой борт

¹ Лобацкая Р.М., Аузина Л.И., Шиленков В.Г., Лиштва А.В. Международная полевая практика на Байкале. География, геология, зоология, ботаника: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 184 с.

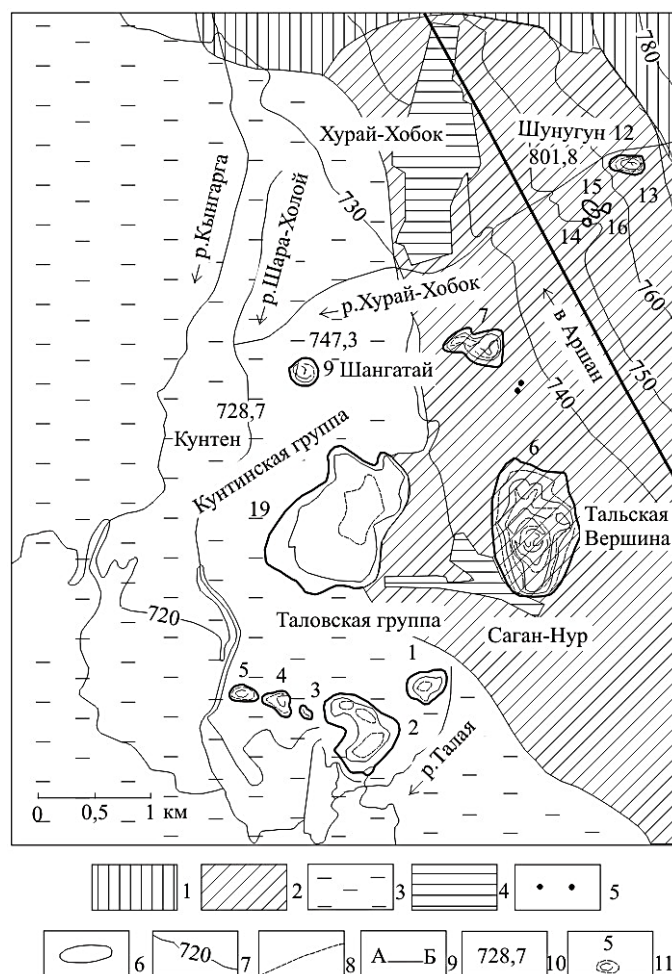


Рис. 2. Геоморфологическая схема с расположением вулканических структур в северо-восточной части Тункинской котловины (Ескин А.С., Бухаров А.А., Зорин Ю.А., 1976):

- 1 – предгорная наклонная равнина; 2 – аллювиальная равнина; 3 – озерно-болотная низина;
4 – населенный пункт; 5 – родники; 6 – контуры вулканов; 7 – горизонтали и их высоты;
8 – полугоризонталы; 9 – линия профиля; 10 – абсолютные отметки высот, м;
11 – вулканическая структура

Fig. 2. Geomorphological diagram indicating the location of the volcanic structures in the north-eastern part of the Tunkinsky depression (Eskin A.S., Bukharov A.A., Zorin Y.A., 1976):

- 1 – piedmont inclined plain; 2 – alluvial plain; 3 – lake-marsh lowland;
4 – settlement; 5 – springs; 6 – contours of volcanoes; 7 – contour lines and their heights;
8 – mediate contours; 9 – profile line; 10 – absolute elevations, m;
11 – volcanic structure

и погружается к югу под долину до нижней границы литосферы под ее южным плечом. Ксенолиты могли поступать с восходящими базальтовыми расплавами с различных глубин по сопутствующим разломам Тункинской разломной зоны [3].

Вулканизм на территории провинции Цзянсу (Китай)

Данная территория в тектоническом плане приурочена к Южно-Китайскому континентальному блоку, который располагается над субдукционной зоной

Тихоокеанской плиты. На территории широко представлены следы вулканической активности в виде вулканических построек.

Субдукция – это процесс погружения одного блока земной коры под другой. При погружении Тихоокеанской плиты под Евразийскую из-за разных скоростей движения субдуцирующей океанской плиты и расположенной над ней континентальной в континентальной литосферной плите возникали зоны



Таблица 1

**Обобщающая таблица позднемезозойского-кайнозойского вулканизма
Тункинской впадины (Южная Сибирь, Россия)**

Table 1

**Summary table of the Late Mesozoic-Cenozoic volcanism
In Tunkinsky Depression (South Siberia, Russia)**

Критерий оценивания	Тункинская впадина, Южная Сибирь
Этапы МЗ-КЗ тектоногенеза:	
четвертый	Плиоцен-четвертичный
третий	Миоцен (нерасчлененный)
второй	Эоцен-олигоцен
первый	Поздний мел – палеоцен
Тип границ литосферных плит	Дивергентная
Геологические структуры	Континентальная Байкальская рифтовая система
Структурная приуроченность вулканизма	Внутрикоровые разломы Тункинского рифта
Вулканические горные породы	Оливиновые толеиты, базаниты, щелочные базальты, гавайиты

растяжения – компенсационные структуры. Эти компенсационные структуры характеризуются утонением и активным растрескиванием коры, вследствие чего становятся наиболее проницаемы для магматического материала, возникающего в ходе трения над субдуцирующей плитой.

Вулканы распределены спорадически, бессистемно и повсеместно приурочены к разломным структурам. Ведущую роль играют разлом первого порядка Тан-Лу и опережающие его тектонические нарушения второго порядка северо-восточного и северо-западного простирания (рис. 3) [4].

На территории выделяется три крупных периода вулканизма: ранне-палеогеновый, неогеновый и плиоцен-четвертичный.

Большая часть раннекайнозойских базальтоидов представлена толеитами, но в некоторых ареалах преобладают щелочные оливиновые базальты и базаниты [5].

Недалеко от г. Нанкин располагается вулканический парк Лухе, в пределах которого наблюдаются наиболее крупные вулканические структуры: Ваншань, Лингуаншань, Губашань, Гуйцзишань.

На рис. 4 представлен вулкан Гуйцзишань (Гуйцзи), который активизировался в плиоцене – плейстоцене. Породы представлены базальтами с большим содержанием железа, а характерная для них базальтовая отдельность имеет форму правильных шестигранных призм.

Вулканическая активность в Восточном Китае, как было сказано выше, является в первую очередь результатом поступления по коровым трещинам субдукционного материала. Характерные вулканические горные породы региона – толеиты, щелочные оливиновые базальты, базаниты (табл. 2). Известно, что некоторые базальты являются продуктами переплавления корового вещества с мантийным и несут в себе мантийные ксенолиты [5, 6]. «Столбчатая отдельность» свидетельствует о спокойном излиянии базальтовой лавы на поверхность [7].

Глобальный тектонический триггер

Однако наряду с вышеописанными процессами рифтинга и субдукции существует еще один процесс, который не мог не оказать влияние на геодинамический режим изучаемых территорий – процесс Индо-Евразийской коллизии.

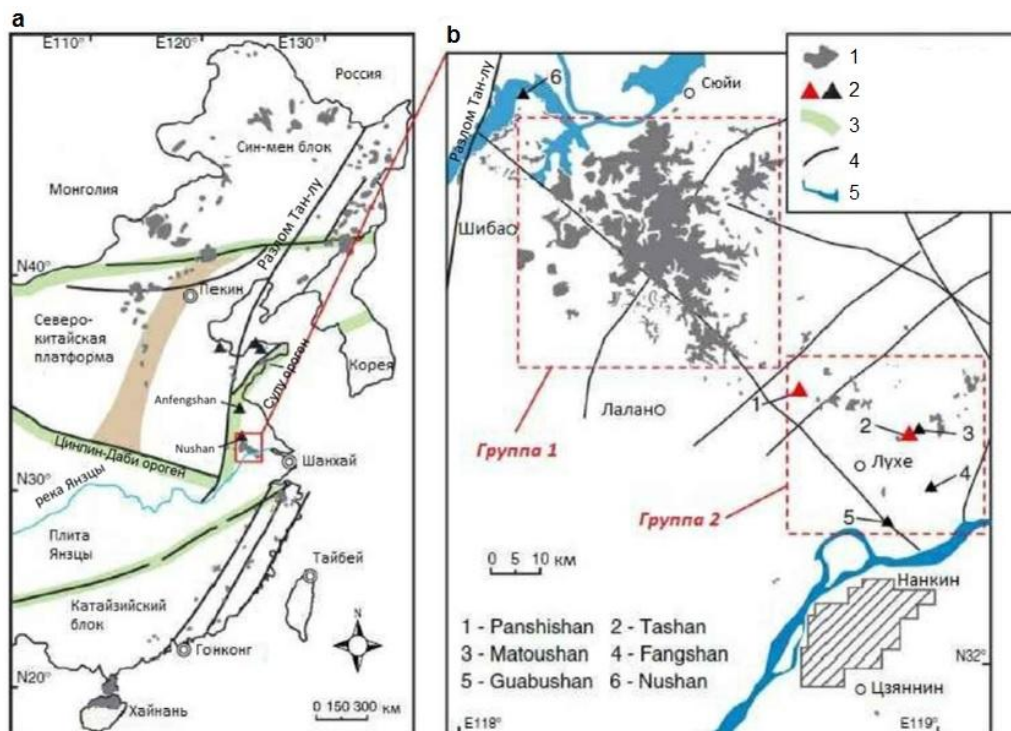


Рис. 3. Схематические карты распределения разломов и продуктов вулканизма в Южно-Китайском континентальном блоке:

a – схематическая геологическая карта восточного Китая (Лю и др., 1992);

b – распределение кайнозойских базальтов в базальтовом поле г. Нанкин, Восточный Китай (Институт геологической службы Аньхой, 1977; Институт геологической службы Цзянсу, 1978; Чжао и др., 1983)

1 – кайнозойские базальты; 2 – вулканы; 3 – границы блоков; 4 – главный разлом; 5 – река и озеро

Fig. 3. Schematic maps of the fault and volcanic product distribution in the South China continental block:

a – schematic geological map of eastern China (Liu et al., 1992);

b – distribution of Cenozoic basalts in Nanjing basaltic field, eastern China (Anhui Institute of Geological Survey, 1977; Jiangsu Institute of Geological Survey, 1978; Zhao et al., 1983)

1 – Cenozoic basalts; 2 – volcanoes; 3 – boundaries of the blocks; 4 – main fault; 5 – river and lake



Рис. 4. Вулкан Гуйцзишань (Гуйцзи) (фото авторов)

Fig. 4. Guizishan Volcano (Guizi) (photo by the authors)



Таблица 2

**Обобщающая таблица позднемезозойского-кайнозойского вулканизма
района Лухе (Восточный Китай)**

Table 2

**Summary table of the Late Mesozoic-Cenozoic volcanism
in Luhe area, East China**

Критерий оценивания	Район Лухе, Восточный Китай
Этапы МЗ-КЗ тектоногенеза:	
четвертый	Плиоцен-четвертичный
третий	Ранний-средний миоцен
второй	Палеоген (нерасчлененный)
первый	
Тип границ литосферных плит	Конвергентная
Геологические структуры	Южно-Китайский континентальный блок над Тихоокеанской зоной субдукции
Структурная приуроченность вулканизма	Компенсационные коровые разломы над зоной субдукции
Вулканические горные породы	Толейты, щелочные оливиновые базальты, базаниты

Столкновение Индийской плиты с Евразийской началось примерно 50 млн лет назад. Индийская плита действовала как индентор, «сжимающий» более пластичные породы Евразийской плиты [8]. Многие исследователи не без оснований считают, что активное рассеянное континентальное разломообразование на тер-

ритории Восточного Китая непосредственно связано с Индо-Евразийским столкновением (рис. 5). В свою очередь разломы, сформировавшиеся как «отклик» на столкновение континентальных плит, и послужили основой для структурной приуроченности и локализации вулканов.

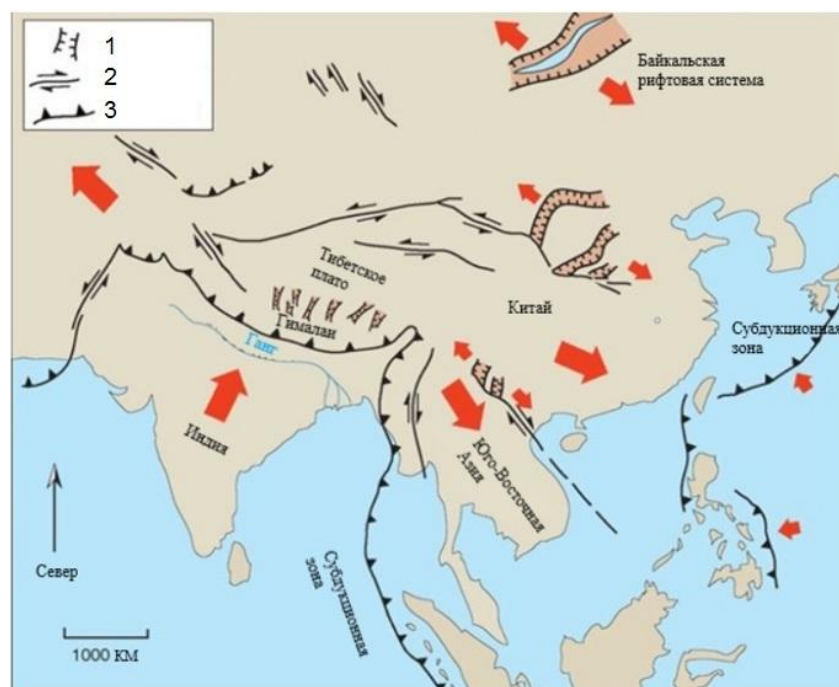


Рис. 5. Схема движения литосферных плит (Molnar P., Tapponier P., 1975)

1 – рифтовая долина; 2 – сдвиговый разлом; 3 – надвиг

Fig. 5. Pattern of lithospheric plate motion (Molnar P., Tapponier P., 1975)

1 – rift valley; 2 – shift fault; 3 – overthrust



Некоторые исследователи не исключают воздействия возникших полей напряжений и на развитие БРС. Современное геодинамическое влияние на сейсмотектонический режим Байкальской рифтовой зоны со стороны Индо-Евразийской зоны коллизии проявляется в виде умеренного горизонтального сжатия литосферы, в основном распространяющегося на юго-западную и в некоторой степени центральную часть Байкальской рифтовой зоны [9]. Но в начальный период столкновения это могло послужить триггером для развития рифтовых процессов.

Заключение

В процессе работы были изучены две территории, находящиеся в разных тектонических областях. Однако, как было показано выше, по некоторым критериям, таким как возраст, вещественный состав,

приуроченность к внутрикоровым разломам, изучаемые объекты имеют некоторые общие черты. Материал, полученный в процессе полевых исследований, дает повод для более углубленного сравнительного анализа (табл. 3).

Как видно из сравнительного анализа (см. табл. 3), проявления вулканизма на обеих территориях укладываются в примерно одинаковые промежутки времени, но в связи с неполной изученностью некоторые периоды вулканической активности остались нерасчлененными, неполными и условно стратифицированными. Также стоит помнить, что данные территории принадлежат различным геодинамическим обстановкам. Тункинская впадина относится к континентальной БРС, а Южно-Китайский континентальный блок располагается над зоной субдукции Тихоокеанской плиты. Но и в первом,

Таблица 3

**Сравнительный анализ позднемезозойского-кайнозойского вулканизма
Тункинской впадины (Южная Сибирь, Россия) и района Лухе (Восточный Китай)**

Table 3

**Comparative analysis of the Late Mesozoic-Cenozoic volcanism
In Tunkinsky depression (South Siberia, Russia) and Luhe area (Eastern China)**

Критерий оценивания	Тункинская впадина, Южная Сибирь	Район Лухе, Восточный Китай
Этапы MZ-KZ тектоногенеза:		
четвертый	Плиоцен-четвертичный	Плиоцен-четвертичный
третий	Миоцен (нерасчлененный)	Ранний-средний миоцен
второй	Эоцен-олигоцен	Палеоген (нерасчлененный)
первый	Поздний мел – палеоцен	
Тип границ литосферных плит	Дивергентная	Конвергентная
Геологические структуры	Континентальная Байкальская рифтовая система	Южно-Китайский континентальный блок над Тихоокеанской зоной субдукции
Структурная приуроченность вулканизма	Внутрикоровые разломы Тункинского рифта	Компенсационные коровые разломы над зоной субдукции
Вулканические горные породы	Оливиновые толеиты, базаниты, щелочные базальты, гавайиты	Толеиты, щелочные оливиновые базальты, базаниты
Глобальный тектонический триггер MZ-KZ активизации	Индо-Евразийская коллизия	
Глобальные структурные последствия на территориях Южной Сибири и Восточного Китая	Активное разломообразование и континентальный вулканизм	



и во втором случае вулканизм приурочен к коровым разломам, возникшим вследствие растяжения земной коры. Вулканические горные породы также имеют схожий состав и связь с мантийным веществом.

Тектоническим триггером для внутриконтинентальной вулкано-тектонической активизации и формирования общих

черт вулканизма в двух областях с различной геодинамической обстановкой в той или иной мере могла послужить Индо-Евразийская коллизия, которая могла стать причиной активного внутриконтинентального разломообразования и, как следствие, континентального вулканизма.

Библиографический список

1. Логачев Н.А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1-2. С. 163–170.

2. Диденков Ю.Н., Аузина Л.И. Гидротермальные системы различных окраин литосферных плит // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Петропавловск-Камчатский, 2019. С. 35–38.

3. Рассказов С.В., Саньков В.А., Ружич В.В., Смекалин О.П. Кайнозойский континентальный рифтогенез: путеводитель геологической экскурсии в Тункинскую рифтовую долину: Всерос. науч. симпозиум с междунар. уч. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. 40 с.

4. Федоров П.И. Кайнозойский вулканизм в зонах растяжения на восточной окраине Азии // Труды Геологического института. 2006. № 537. С. 1–316.

5. Zeng G., Chen L.-H., Hu S.-L., Xu X.-S., Yang L.-F. Genesis of Cenozoic low-Ca alkaline basalts in the Nanjing basaltic field, eastern China: The case for mantle xenolith-magma interaction //

Geochemistry Geophysics Geosystems. 2013. Vol. 14. Iss. 5. P. 1660–1677. <https://doi.org/10.1002/ggge.20127>

6. Fang Y., Peng D., Lin C. The study of basalt and its xenolith of mt. Fang in Luhe county, Kiangsu province // Journal of Nanjing University. 1979. Vol. 3. P. 57–75.

7. Трапезников Д.Е., Сунцев А.С., Рыбальченко Т.М. К вопросу о происхождении столбчатой отдельности в базальтах и ее аналогов // Вестник Пермского университета. Геология. 2012. № 2. С. 8–15.

8. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision // Science. 1975. Vol. 189. No. 4201. P. 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>

9. Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Левина Е.А. Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сейсмотектонический режим Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 383–406. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0214>

References

1. Logachev NA. The main structural features and geodynamics of the Baikal rift zone. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 1999;2(1-2):163–170. (In Russ.)

2. Didenkov YuN, Auzina LI. Hydrothermal systems of various lithospheric plates margins. *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefi i gaza: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* = Geothermal Volcanology Workshop 2019: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation. Petropavlovsk-Kamchatsky; 2019. p.35–38. (In Russ.)

3. Rasskazov SV, San'kov VA, Ruzhich VV, Smekalin OP. *Cenozoic continental rifting: Guidebook of the geologic excursion to the Tunka rift*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2010. 40 p. (In Russ.)

4. Fedorov PI. Cenozoic volcanism of extension zones of the Eastern Asia continental margin. *Transaction of the Geological Institute*. 2006;537:1–316. (In Russ.)

5. Zeng G, Chen L-H, Hu S-L, Xu X-S, Yang L-F. Genesis of Cenozoic low-Ca alkaline basalts in the Nanjing basaltic field, eastern China: The case for mantle xenolith-magma interaction. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2013;14(5):1660–1677. <https://doi.org/10.1002/ggge.20127>

6. Fang Y, Peng D, Lin C. The study of basalt and its xenolith of mt. Fang in Luhe county, Kiangsu province. *Journal of Nanjing University*. 1979;3:57–75.

7. Trapeznikov DE, Suntsev AS, Rybalchenko TM. On the question of origin of the columnar separately in the basalts and its analogs. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya* = Bulletin of Perm University. Geology. 2012;2:8–15. (In Russ.)



8. Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*. 1975;189(4201):419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>

9. Ruzhich VV, Kocharyan GG, Levina EA. Estimated geodynamic impact from zones of collision and subduction on the seismotectonic regime in the Baikal rift. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016;7(3):383–406. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0214>

Критерии авторства / Authorship criteria

Лобацкая Р.М., Аузина Л.И., Чжан Юнчжань, Вантеева М.А., Сапрыкина М.И., Семилет А.А., Гиренко Ю.Е. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Raisa M. Lobatskaya, Larisa I. Auzina, Yongzhan Zhang, Marina A. Vanteeva, Maria I. Saprykina, Andrey A. Semilet, Yuriy E. Girenko are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

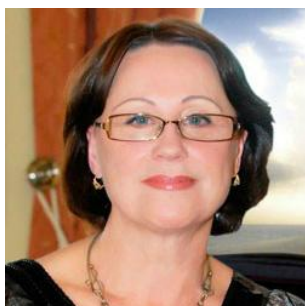
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Лобацкая Раиса Моисеевна,

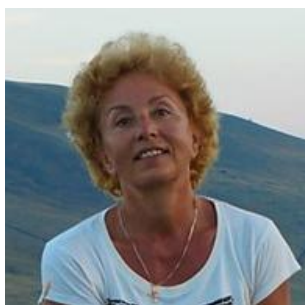
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: lobatskaya@gmail.com

Raisa M. Lobatskaya,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Head of the Department of Jewelry Design and Technology,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: lobatskaya@gmail.com



Аузина Лариса Ивановна,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: lauzina@mail.ru

Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Docent,
Associate Professor, Department of Applied Geology,
Geophysics, and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: lauzina@mail.ru



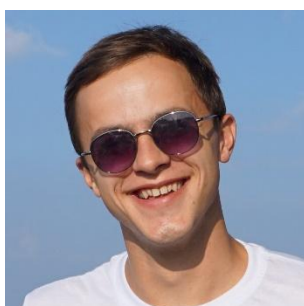
Чжан Юнчжань,
кандидат наук,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сяньлинь, 163, Китай,
e-mail: zhangyzh@nju.edu.cn
Yongzhan Zhang,
PhD,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: zhangyzh@nju.edu.cn



Вантеева Марина Андреевна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vanteeva98@mail.ru
Marina A. Vanteeva,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: vanteeva98@mail.ru



Сапрыкина Мария Игоревна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: msaprykina@live.ru
Mariya I. Saprykina,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: msaprykina@live.ru



Семилет Андрей Алексеевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: andrey.semilet.99@mail.ru
Andrey A. Semilet,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: andrey.semilet.99@mail.ru



Гиренко Юрий Евгеньевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: girenkoyurii@mail.ru
Yuriy E. Girenko,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: girenkoyurii@mail.ru



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- геологическое строение месторождений полезных ископаемых;
- тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
- минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
- генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых и других геологических объектов;
- 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;
- 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 и технология художественной обработки минералов и горных пород;
- гидрогеология и инженерная геология;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!



5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху, снизу, слева и справа – 2,5 см, абзацный отступ – 1 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском/китайском/монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и/или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 160×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте. Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитиро-



вание автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. 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. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

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 научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Стоимость печатного экземпляра журнала – 500 рублей.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте 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, ауд. Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo_info@istu.edu

Статьи следует направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: +7 (3952) 405069, e-mail: nzn@istu.edu, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

© Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^b, А.Е. Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель. Цель данной статьи заключается в исследовании технологических типов руд Томинского месторождения меди, изучении минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-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

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

© Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye 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 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.

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

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение (выводы)), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorship criteria) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Сведения об авторах / Information about the authors

Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru
Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: ymar@istu.edu
Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
✉ e-mail: ymar@istu.edu

Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru
Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 43 № 1 (70) 2020

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык Е.Н. Петровой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.03.2020 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,75.
Тираж 500 экз. Зак. 92. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

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