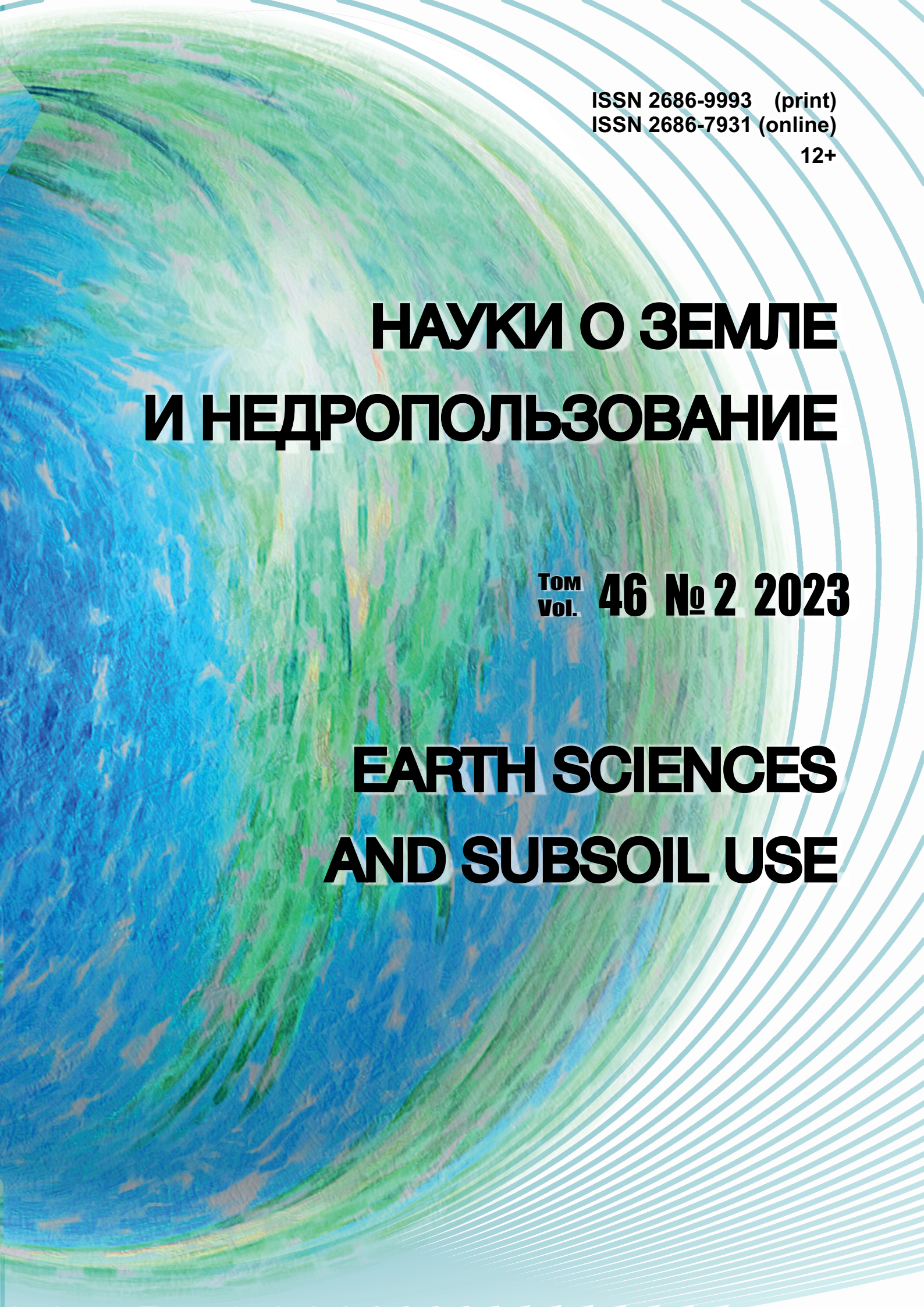




ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom 46 № 2 2023
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

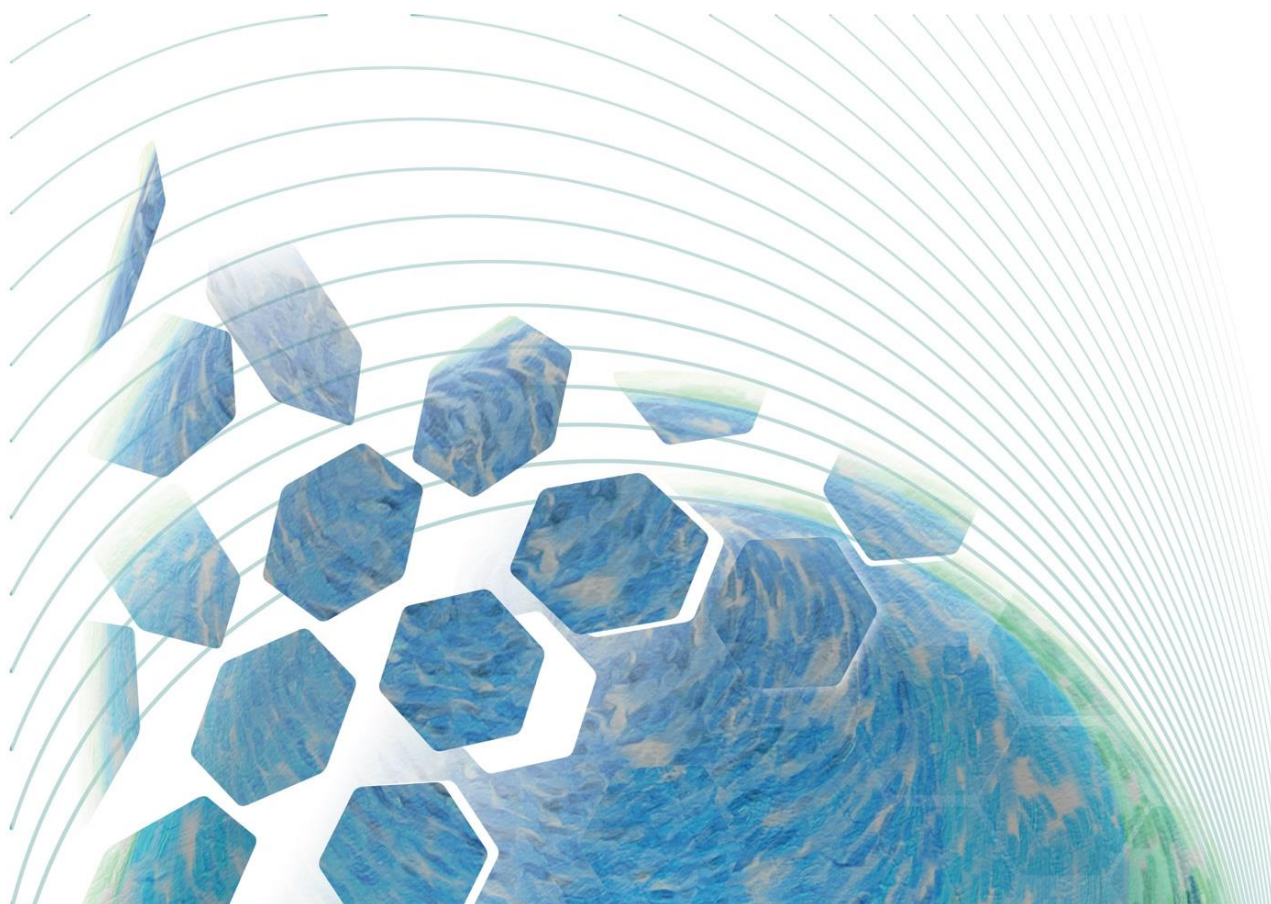
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 46 № 2 2023

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



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)

Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, 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)

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:

Паршин А.В., канд. геол.-минерал. наук, профессор практики, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

Долгих М.Н., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» **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 ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). 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)

Регистрационный номер:
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», 2023

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)

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

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. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Parshin A.V., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Scientific Director of the Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

Auzina L.I., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary

Dolgikh M.N., Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" 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 CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiryak St., Yekaterinburg 620026, Russia). 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 Interuniversity 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)

Registration No.:
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", 2023



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	146
-----------------	-----

Геофизика

Заплавнова А.А., Поспеева Е.В., Оленченко В.В. Глубинное строение зоны сочленения Кузнецкого прогиба и Камжелинского блока Кузнецкого Алатау по данным магнитотеллурических зондирований.....	148
Оцимик А.А., Буддо И.В. Изучение криогидрогеологических условий с помощью электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне на примере западной части Якутского артезианского бассейна.....	160
Снегирёв Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки.....	182

Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верховина Е.С. Особенности формирования Свирского месторождения пресных подземных вод.....	190
Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения.....	201

Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Храмовских В.А., Шевченко А.Н., Непомнящих К.А. Адаптивный интеллектуальный анализ данных как инструмент для прогнозирования ресурса узлов горных машин и оборудования.....	212
Шакирова Э.В., Семькин М.В. Прогнозирование аварий на погружном насосном оборудовании с использованием методов искусственного интеллекта.....	226

Персоналия

Корольков А.Т. Геология из рук в руки (к 85-летию профессора Алексея Ивановича Трубачева).....	234
---	-----

К юбилейным датам

Рапацкая Л.А. К 50-летию Керуленской международной геологической экспедиции.....	244
К сведению авторов	257



CONTENTS

Contents.....	147
---------------	-----

Geophysics

Zaplavnova A.A., Pospeeva E.V., Olenchenko V.V. The deep structure of the Kuznetsk deflection and Kamzhelinsky block junction zone of the Kuznetsk Alatau according to magnetotelluric sounding data.....	148
Otsimik A.A., Buddo I.V. Cryohydrogeological settings appraisal by shallow near-field TEM sounding: a case study of the western part of the Yakut artesian basin.....	160
Snegirev N.V., Gachenko S.V., Parshin A.V. Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey.....	182

Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny

Kuranicheva A.I., Lankin Yu.K., Naumova O.O., Verkhozina E.S. Formation features of the Svirsk fresh groundwater deposit.....	190
Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone.....	201

Applied mining and petroleum field geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry

Khramovskikh V.A., Shevchenko A.N., Nepomnyashchikh K.A. Adaptive data mining as a tool to predict mining machinery and equipment assembly life.....	212
Shakirova E.V., Semykin M.V. Submersible pumpset failure prediction using artificial intelligence methods.....	226

Personalia

Korolkov A.T. Geology from hand to hand (to the 85 th anniversary of the Professor Aleksey Ivanovich Trubachev)	234
---	-----

Anniversaries

Rapatskaya L.A. On the 50 th anniversary of the Kerulen International Geological Expedition.....	244
Information for the Authors	257



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.379

<https://elibrary.ru/ffbvce><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-148-159>

Глубинное строение зоны сочленения Кузнецкого прогиба и Камжелинского блока Кузнецкого Алатау по данным магнитотеллурических зондирований

А.А. Заплавнова^а, Е.В. Поспеева^б, В.В. Оленченко^с^{а-с}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Резюме. Кельбес-Золотокитатский район является одним из старейших золотороссыпных узлов Кузнецкого Алатау (Западная Сибирь, Россия). В настоящее время в данном районе отрабатываются в основном мелкозалегающие долинные аллювиальные россыпи. Тем не менее предполагается, что в россыпных месторождениях сосредоточена малая часть ресурсов золота района, а крупные коренные источники золота до сих пор остаются необнаруженными. В зоне сочленения Кузнецкого прогиба и Камжелинского блока глубинное строение золоторудных районов, узлов и полей почти не изучалось, также не анализировались региональные закономерности размещения золотого оруденения, отражающиеся в физических полях. В представленной работе рассмотрены результаты магнитотеллурических исследований в комплексе с результатами анализа потенциальных геофизических полей с целью поиска рудоконтролирующей структуры, вмещающей коренные источники золота. Выбранный комплекс методов эффективен для изучения коровых неоднородностей, пространственно связанных с рудоносными структурами Кузнецкого Алатау. На геоэлектрическом разрезе выделена проводящая неоднородность с вертикальной мощностью до 7 км, вызванная эндогенными каналами флюидно-магматической переработки пород фундамента и ограниченная глубокопроникающими разломными зонами. Значимым результатом проведенного исследования, помимо прочего, является обнаружение признаков интрузивного магматизма на территории Кузнецкой впадины. Глубина залегания кровли гранитоидного тела составляет 5 км. Также отмечено, что перспективной для дальнейших исследований по детальной сети наблюдений является зона водораздела рек Конюхты и Сухой.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, потенциальные поля, рудная геофизика, золотое оруденение

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

Благодарности: Авторы благодарны кандидату технических наук старшему научному сотруднику Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН В.В. Потапову за помощь в проведении полевых измерений методом магнитотеллурических зондирований, а также генеральному директору ООО «Барзасская экспедиция» В.В. Гонееву за содействие в проведении полевых работ.

Для цитирования: Заплавнова А.А., Поспеева Е.В., Оленченко В.В. Глубинное строение зоны сочленения Кузнецкого прогиба и Камжелинского блока Кузнецкого Алатау по данным магнитотеллурических зондирований // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 148–159. <https://elibrary.ru/ffbvce>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-148-159>.

GEOPHYSICS

Original article

The deep structure of the Kuznetsk deflection and Kamzhelinsky block junction zone of the Kuznetsk Alatau according to magnetotelluric sounding data

Anna A. Zaplavnova^a, Elena V. Pospeeva^b, Vladimir V. Olenchenko^c^{a-с}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

© Заплавнова А.А., Поспеева Е.В., Оленченко В.В., 2023



Abstract. The Kelbes-Zolotokitat region is one of the oldest gold-placer nodes in the Kuznetsk Alatau (Western Siberia, Russia). The production target in this area nowadays is mainly shallow valley alluvial placers. However, it is assumed that placer deposits accumulate a minor part of the region's gold resources, while large primary gold sources still remain undetected. Neither deep structure of gold ore regions, nodes and fields in the junction zone between the Kuznetsk deflection and the Kamzhelinsky block nor the regional distribution patterns of gold mineralization reflected in physical fields have been given proper investigation and analysis. The paper deals with the results of magnetotelluric studies together with the analysis results of potential geophysical fields in order to search for an ore-controlling structure hosting primary gold sources. The selected complex of methods is efficient for studying crustal heterogeneities spatially associated with ore-bearing structures in the Kuznetsk Alatau. A conductive heterogeneity with the vertical thickness up to 7 km caused by the endogenous channels of basement rocks fluid-magmatic processing and limited by deep-penetrating fault zones has been distinguished on the geoelectric section. The identified signs of intrusive magmatism in the area of the Kuznetsk deflection is also a significant result. The depth of the top of the granitoid body is 5 km. The watershed zone of the Konyukhta and Sukhaya rivers is marked as promising for further research using a detailed observation network.

Keywords: magnetotelluric sounding, potential fields, ore geophysics, ore-grade gold mineralization

Funding: The research is supported by the Fundamental Research Program project No. FWZZ-2022-0024.

Acknowledgements: The authors thank the Senior Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS V.V. Potapov, Cand. Sci. (Eng.), for his help in carrying out field magnetotelluric sounding measurements. The authors also express their gratitude to the General Director of LLC "Barzas Expedition" V.V. Goneev for his assistance in conducting the field works.

For citation: Zaplavnova A.A., Pospeeva E.V., Olenchenko V.V. The deep structure of the Kuznetsk deflection and Kamzhelinsky block junction zone of the Kuznetsk Alatau according to magnetotelluric sounding data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):148-159. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ffbvce>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-148-159>.

Введение

Кельбес-Золотокитатский район расположен в северных предгорьях Кузнецкого Алатау в переходной к Западно-Сибирской низменности геоморфологической зоне (междуречье Барзас – Кельбес – Золотой Китат). Данный район находится в геологических структурах северной части Кузнецкого Алатау, которые далее к северу перекрываются осадочным чехлом Западно-Сибирской низменности, а с запада ограничиваются Кузнецкой впадиной. Он расположен примерно в 30 км к западу от Кузнецко-Алтайского разлома в пределах Пезасского поднятия, входящего в состав Золотокитат-Кондомской структурно-формационной зоны океанического типа [1]. Кельбес-Золотокитатский район является одним из старейших золотороссыпных узлов Кузнецкого Алатау. В районе распространены различные генетические типы россыпей – от элювиальных и делювиальных до озерно-аллювиальных и прибрежно-морских, имеющие также различный возраст от мелового до четвертичного периода [2, 3]. В настоящее время здесь

отрабатываются в основном неглубокозалегающие долинные аллювиальные россыпи. Тем не менее предполагается, что в россыпных месторождениях сосредоточена лишь малая часть золотых запасов района, а коренные источники до сих пор остаются необнаруженными^{1,2} [4–6]. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема поиска коренных источников золотого оруденения как в пределах известных россыпных месторождений, так и на новых перспективных площадях. Эндегенные рудогенерирующие системы построены по единой схеме, включающей три уровня: зону генерации или глубинный источник мобильной фазы (магм или флюидов) с растворенными в ней рудными компонентами; транспортную зону или дренажную сеть, выводящую мобильную фазу в верхние горизонты земной коры; зону консолидации, где мобильная фаза кристаллизуется (в случае магматических расплавов) или сбрасывает рудную нагрузку и рассеивается (в случае флюидных потоков) [7].

¹ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.

² Саморуков В.И., Крекова А.В., Панченко А.В. Геологический отчет по объекту «Поиски и оценка месторождений золота в отложениях симоновской свиты и меловых корах выветривания в границах лицензии КЕМ 00932 ТР (Барзасская площадь)». Кемерово: ООО «Барзасская экспедиция», 2019.



Из множества факторов рудоотложения важнейшими являются структурно-тектонические. Их изучению, картированию в целях металлогенического анализа, особенно рудных районов и узлов, традиционно придается большое значение. Важную роль при этом играют геофизические методы, к отличительным чертам которых можно отнести высокую мобильность и производительность, возможность опробования закрытых площадей, глубинность исследований, равномерность изучения больших территорий, сочетание методов прямой и косвенной индикации оруденения. В общем комплексе геофизических исследований одно из ведущих мест занимает метод магнитотеллурического зондирования, позволяющий получать информацию о глубинном строении литосферы Земли. Анализ закономерностей размещения полезных ископаемых в основных рудных провинциях показал, что провинции, районы, крупные узлы и поля месторождений эндогенного генезиса закономерно сопряжены с геоэлектрическими неоднородностями различного класса и ранга в определенных сочетаниях для различных полезных ископаемых. Данные соотношения сохраняются в масштабах металлогенических провинций, металлогенических зон, рудных районов и отдельных крупных рудных узлов. Ввиду этого основной целью настоящих исследований стало изучение особенностей строения разреза земной коры (включая осадочный чехол) Кельбес-Золотокитатского района и их связи с проявлениями золотоносного оруденения.

Несмотря на длительный срок исследования и эксплуатации золотоносных россыпей, золотое оруденение Кельбес-Золотокитатского района изучено слабо. Мелко- и средне-масштабные россыпи известны практически по всем водотокам района, в том числе по рекам Кельбес, Селла, Барзас, Суета, Еденис, Сухая, Никольская, Солонешная и др.^{3,4} [3].

Зона сочленения Кузнецкого прогиба и Камжелинского блока Кузнецкого Алатау разделена системой Кузнецко-Алатаусского разлома. Разлом представляет собой взброс или крутой надвиг. Об этом свидетельствуют соприкасающиеся в плоскости главного сместителя разлома интенсивно дислоцированные породы девонского и карбонового возрастов в лежачем крыле (западная часть) и рифейско-кембрийские отложения в висячем крыле (восточная часть). Асимметричное строение системы складчатых структур относительно главной плоскости разлома вызвано различным режимом его развития⁵.

Структура изучаемого района представляет собой сложное чередование горстов и грабенов север-северо-западного простирания, ограниченных крупными разломными зонами. Наиболее древние породы в пределах изучаемого участка, возраст которых отнесен к верхнему рифею, выделяются как «суховский метаморфический комплекс» ($R_3?s$). Породы данного комплекса делятся на два подкомплекса: амфиболитовый ($R_3?s^a$) и мраморный ($R_3?s^m$), при этом западная часть Суховского горста сложена породами амфиболитового подкомплекса, а восточная часть – породами мраморного подкомплекса. Мраморный подкомплекс представлен преимущественно кальцитовыми мраморами, нередко графитистыми и слюдястыми, реже доломитовыми.

Выходы древней метаморфической толщи камжелинской свиты (R_3-C_1) представлены metabазальтами, сланцами, песчаниками, мраморизованными известняками, относящимися к Суховскому горсту. Породы свиты метаморфизованы до зеленосланцевой фации, катаклазированы, милонитизированы и насыщены дайками и штоками долеритов, габбродолеритов, порфиритов.

Пезасская серия венд-рифейских образований (R_3-Vpz) слагает Яйский горст. Породы представлены мраморизованными известня-

³ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.

⁴ Саморуков В.И., Крекова А.В., Панченко А.В. Геологический отчет по объекту «Поиски и оценка месторождений золота в отложениях симоновской свиты и меловых корах выветривания в границах лицензии КЕМ 00932 ТР (Барзасская площадь)». Кемерово: ООО «Барзасская экспедиция», 2019.

⁵ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.



ками, часто углеродистыми и битуминозными, с горизонтами доломитов, мергелей, углеродисто-кремнистых сланцев и кварцитов.

Восточное крыло Тугонаковской грабен-синклинали выполнено нерасчлененными отложениями восточно-кузбасской серии среднего – верхнего девона (D_2-3vk), сложенными песчаниками, алевролитами, гравелитами, пестроцветными конгломератами и прослоями известняков. Выше по разрезу залегают отложения нижнего карбона. Они представлены песчаниками, алевролитами, известняками, углистыми аргиллитами и прослойками угля.

Интрузивные образования занимают небольшую часть площади и представлены Успенским габбро-диорит-долеритовым массивом писаревского комплекса (ϵ_1), небольшими телами гранодиоритов и граносиенитов ($D_1?$) тельбесского комплекса^{6,7}.

Слабая проявленность интрузивного магматизма в районе исследований не исключает существования связанных с ним рудных источников золото-скарнового или золото-сульфидно-кварцевого типов. Золотое оруденение предположительно связано с гидротермальными изменениями пород дайкового пояса. Это может быть следствием того, что и внедрение даек, и циркуляция рудообразующих растворов происходили по одним и тем же проницаемым зонам. Дайки под воздействием растворов претерпевали изменение, и наряду с жильным золото-кварцевым формировалось прожилково-вкрапленное золото-сульфидно-кварцевое оруденение [6].

По результатам геохимического опробования^{8,9} [3, 4, 6] отмечается аномально высокое фоновое содержание золота в углеродистых сланцах камжелинской свиты. Значительные вариации в содержании золота указывают на

интенсивные метаморфогенно-гидротермальные преобразования углеродистых сланцев Камжелинского узла.

Материалы и методы исследования

Магнитотеллурические исследования были выполнены по профилю вдоль рек Конюхты и Сухой (рис. 1). Общая протяженность профиля составляет около 30 км. Расстояние между пунктами зондирования варьировалось от 1,5 до 5 км в зависимости от транспортной доступности.

Полевые измерения выполнялись аппаратурой канадской фирмы Phoenix Geophysics в диапазоне периодов 0,003–10000 с. Использовались три измерительных модуля MTU-5, позволяющих регистрировать четыре компоненты (E_x , E_y , H_x , H_y) магнитотеллурического поля. Применялась крестообразная установка с длиной электрических диполей 100 м. Средняя длительность записи составляла 21 ч.

Обработка и интерпретация данных осуществлялась в программных комплексах SSMT-2000, WinGLink и состояла из следующих этапов:

- обработка четырехкомпонентных записей магнитотеллурического поля;
- приведение симметричного тензора к главным осям.

Известно, что при вращении импеданса $[Z]$ можно получить множество амплитудных и фазовых кривых ρ_{xy} , конфигурация которых существенно зависит от их ориентации и которые могут противоречить друг другу. В связи с этим после первичной обработки полевых данных на каждом пункте проводился анализ амплитудных и фазовых полярных диаграмм тензора импеданса и определялись его главные направления [8, 9].

⁶ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.

⁷ Саморуков В.И., Крекова А.В., Панченко А.В. Геологический отчет по объекту «Поиски и оценка месторождений золота в отложениях симоновской свиты и меловых корах выветривания в границах лицензии КЕМ 00932 ТР (Барзасская площадь)». Кемерово: ООО «Барзасская экспедиция», 2019.

⁸ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.

⁹ Саморуков В.И., Крекова А.В., Панченко А.В. Геологический отчет по объекту «Поиски и оценка месторождений золота в отложениях симоновской свиты и меловых корах выветривания в границах лицензии КЕМ 00932 ТР (Барзасская площадь)». Кемерово: ООО «Барзасская экспедиция», 2019.

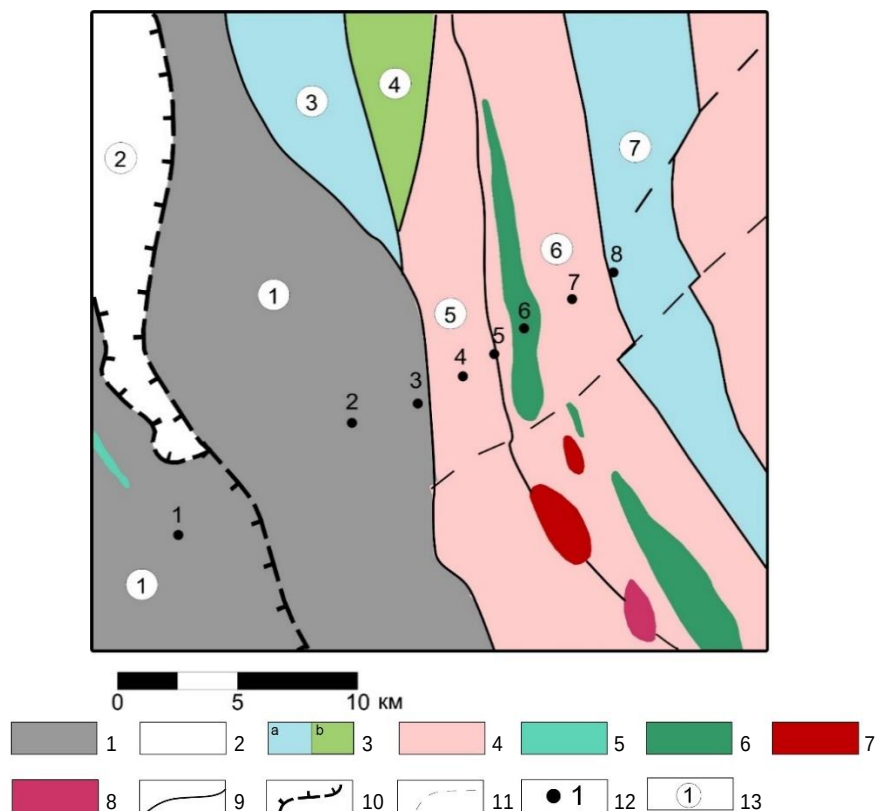


Рис. 1. Схема тектонического строения зоны сочленения Кузнецкого прогиба и Кузнецкого Алатау¹⁰:

1 – герцинские наложенные прогибы ($D-P_2$); 2 – тектонический меланж; 3 – Бийско-Золотокитатская складчатая зона: а – раннекаледонский ($V-C_1$), б – позднекаледонский ($C_{2-3}-D_1$) структурные этажи; 4 – выступы позднерифейского основания; 5 – абинский трапповый трахибазальтовый комплекс; 6 – писаревский габбро-диорит-диабазовый комплекс; 7, 8 – олгинский комплекс: 7 – третья фаза, 8 – первая фаза; 9 – главные разломы, характеризующие границы структурных этажей, ярусов; 10 – надвиги; 11 – второстепенные разломы; 12 – пункты магнитотеллурических зондирований; 13 – структурные этажи, ярусы, подъярусы: Кузнецкий прогиб (1), Яя-Кельбесский грабен (2), Яйский горст (3), Кельбесский грабен (4), Камжелинский блок (5), Суховский блок (6), Мурюкский грабен (7)

Fig. 1. Tectonic structure diagram of the junction zone between the Kuznetsk deflection and the Kuznetsk Alatau¹⁰:

1 – Hercynian superimposed deflections ($D-P_2$); 2 – tectonic melange; 3 – Biysk-Zolotokitatskaya folded zone: a – Early Caledonian ($V-C_1$), b – Late Caledonian ($C_{2-3}-D_1$) structural stages; 4 – protrusions of the late Riphean base; 5 – Abinsk trap trachybasalt complex; 6 – Pisarevsky gabbro-diorite-dabase complex; 7, 8 – Olginsky complex: 7 – the third phase, 8 – the first phase; 9 – main faults characterizing the boundaries of structural floors, tiers; 10 – thrusts; 11 – secondary faults; 12 – locations of magnetotelluric soundings; 13 – structural floors, tiers, subtiers: Kuznetsk deflection (1), Yaya-Kelbes graben (2), Yaya horst (3), Kelbes graben (4), Kamzhelinsky block (5), Sukhovsky block (6), Muryuk graben (7)

Поперечные кривые смещены по оси сопротивлений ρ вверх по всей оси периодов. Они описываются асимптотической функцией на больших временах (рис. 2).

Результаты исследования

На основе данных Государственной геологической карты масштаба 1:200000 (лист

N-45-III (Кемерово))¹¹, аэромагнитометрии и аэрогравиметрии были построены графики магнитного и гравитационного полей (рис. 3, а).

По особенностям распределения удельного электрического сопротивления ($УЭС$) на разрезе выделяется три блока: юго-западный (I, пункты 1–3), центральный (II, пункт 4) и северо-восточный (III, пункты 5–8) (рис. 3, с).

¹⁰ Бабин Г.А., Гусев Н.И., Юрьев А.А., Уваров А.Н., Дубский В.С., Черных А.И. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 (Новокузнецк). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 665 с.

¹¹ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.

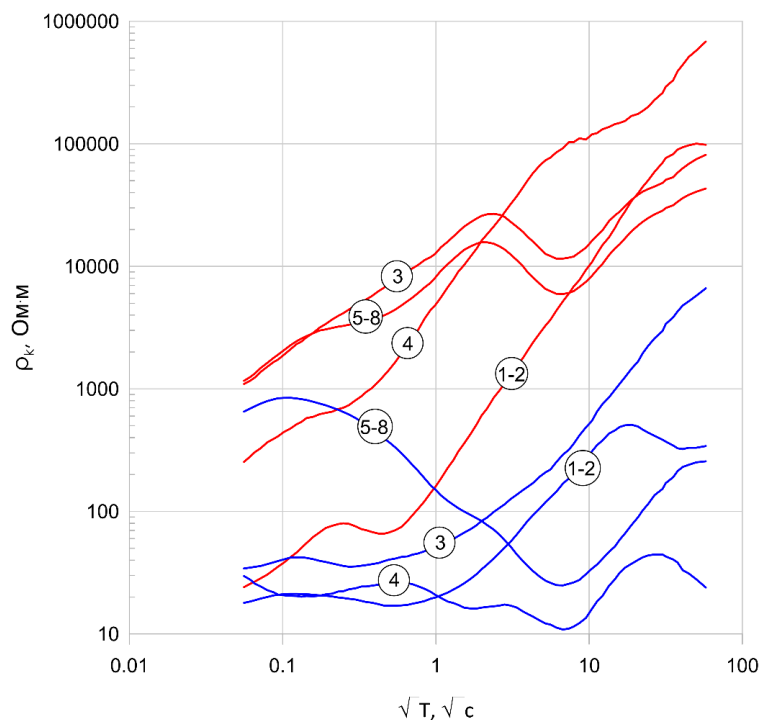


Рис. 2. Продольные (ТЕ-мода) и поперечные (ТМ-мода) магнитотеллурические кривые
Красным цветом показаны поперечные кривые, синим цветом – продольные
Fig. 2. Longitudinal (TE-mode) and transverse (TM-mode) magnetotelluric curves
The transverse curves are red; longitudinal curves are blue

Верхняя часть разреза блока I включает каменноугольные отложения, представленные преимущественно песчаниками, алевролитами, углистыми аргиллитами с прослоями каменного угля. Среднее УЭС слоя составляет 20–40 Ом·м. Общая мощность слоя изменяется с юго-запада на север-восток с 1000 до 800 м. Палеозойское основание представлено девонскими песчаниками и алевролитами со значениями УЭС 60–90 Ом·м и общей мощностью около 4 км. На глубинах порядка 5 км выделяется высокоомная область, обусловленная гранитоидным магматизмом с УЭС более 900 Ом·м.

Блок II представлен сложнопостроенной проводящей неоднородностью в зоне водораздела рек Конюхты и Сухой. От блоков I и III она отделена зонами Кузнецко-Алатаусского разлома. Центральная часть характеризуется самыми низкими значениями УЭС 15 Ом·м. Кровля располагается на глубине 1 км, вертикальная мощность оценивается в 7 км. Такая обширная неоднородность предположительно связана с флюидной системой рудообразующей зоны. Сложная форма аномалии возникла в результате влияния глубокопроникающих разломов, ограничивающих зону ру-

дообразования. Стоит отметить, что такие разломы служат флюидопроводниками в период своего активного существования [10], а следовательно, выделяются на разрезе пониженными значениями УЭС в 30 Ом·м. Разделение источников проводящих неоднородностей на данном этапе исследований невозможно из-за редкой сети наблюдений и близких физических свойств геологических объектов.

Для северо-западного блока (III) характерно трехслойное строение. Верхний слой сложен метаморфическим комплексом камжелинской свиты (R_3-C_1), вскрытым разведочными скважинами в пределах Камжелинского блока и представленным метабазами, сланцами, песчаниками, мраморизованными известняками. Для данных пород характерны высокие значения УЭС в пределах 600–900 Ом·м. Мощность слоя изменяется от 1000 м до полного выклинивания в пункте 5. Ниже по разрезу залегают рифей-вендские отложения (R_3-Vpz), представленные известняками и доломитами. Средние УЭС слоя составляют от 200 до 300 Ом·м. Мощность изменяется от 4000 м до полного выклинивания. Мощность третьего слоя превышает 3000 м, но не может быть достоверно определена. Предполагается

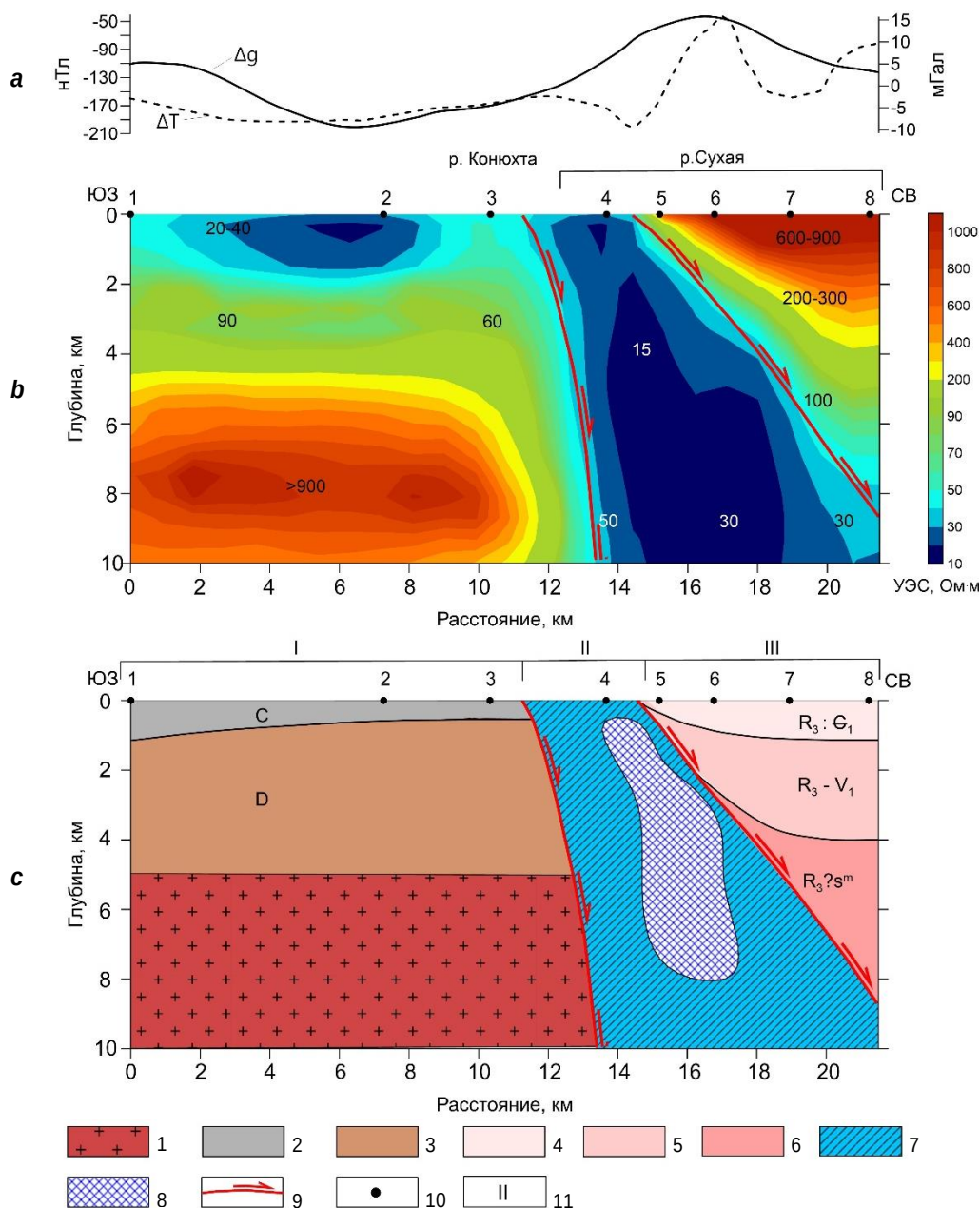


Рис. 3. Графики магнитного и гравитационного поля (а)¹², геоэлектрический разрез (b) и интерпретационный разрез (с) вдоль профиля Конюхты – Сухая

Значения удельного электрического сопротивления указаны в Ом·м

1 – предполагаемый гранитоидный массив; 2 – песчаники, алевролиты, углистые аргиллиты и каменный уголь карбонского периода; 3 – девонские песчаники и алевролиты; 4 – камжелинская свита (R_3-E_1); 5 – известняки и доломиты венд-рифейских образований (R_3-V_{pz}); 6 – трещиноватые мраморы (R_3-s^m); 7 – зона трещиноватости; 8 – предполагаемая зона рудогенерации; 9 – границы зоны трещиноватости; 10 – пункты магнитотеллурических зондирований; 11 – номера блоков

Fig. 3. Graphs of magnetic and gravitational fields¹² (a), a geoelectric section (b) and an interpretative section (c) along the Konyukhta – Sukhaia profile

Electrical resistivity values are given in Ohm·m

1 – presumed granitoid massif; 2 – sandstones, siltstones, carbonaceous mudstones and bituminous coal of the Carboniferous period; 3 – Devonian sandstones and siltstones; 4 – Kamzhelinskaya suite (R_3-E_1); 5 – Vendian-Riphean limestones and dolomites (R_3-V_{pz}); 6 – fissured marble (R_3-s^m); 7 – fracture zone; 8 – presumed ore generation zone; 9 – fracture zone boundaries; 10 – locations of magnetotelluric soundings; 11 – block numbers

¹² Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.



распространение мраморного подкомплекса «суховского метаморфического комплекса» ($R_3^?s^m$) со значениями УЭС 100 Ом·м. Пониженные значения сопротивлений метаморфических комплексов объясняются повышенной трещиноватостью пород. По данным геологического картирования, отмечаются интенсивные процессы милонизации приконтактных зон, которые приводят к понижению УЭС горных пород.

Обсуждение полученных результатов

Особый интерес представляет проводящая неоднородность, выделенная в зоне водораздела рек Конюхты и Сухой по результатам магнитотеллурических зондирований. Над этой электрической аномалией отмечается повышение значений магнитного и гравитационного полей (см. рис. 3, а). Положительные аномалии потенциальных геофизических полей являются одним из признаков рудопоявления района, а форма графиков соответствует форме наклонного тела большой мощности¹³, что дополнительно подчеркивает интерес этого участка в качестве коренного золоторудного источника.

Согласно гравиметрической модели¹⁴, тектонический шов Кузнецко-Алатаусского разлома сопровождается крупной зоной разуплотнения. Согласно результатам анализа гравиметрических данных, на глубине 500–1000 м отмечается гипотетический гипоцентр очага гидротермальной проработки. Протяженная магнитная аномалия, выделенная на картах магнитного поля, интерпретируется как дайковый пояс основного состава и представлена

диабазами, габбродиабазами. Аномалия прослеживается на расстояние более 10 км¹⁵ [11, 12]. Золотоносность дайкового пояса и околодайкового пространства установлена по результатам проведенных горных работ и косвенно подтверждается контурами старательских отработок разных лет^{16,17} [4, 6].

Не менее важным результатом является выделение неоднородности с высокими значениями УЭС (более 900 Ом·м). Кровля выделенного объекта располагается на глубине 5 км. Высокие значения УЭС характерны для интрузивных образований. Высокоомная неоднородность располагается в пределах Кузнецкого прогиба, который относится к унаследованным прогибам среднего палеозоя [13]. Образование унаследованных прогибов сопровождалось интенсивной вулканической деятельностью. Исходя из таких условий можно предположить, что интрузивный магматизм здесь проявлен более широко, но не отмечается выходами на дневную поверхность. В пределах Кельбес-Золотокитатского рудного узла известен только один интрузивный массив, сложенный габбро, габбро-диабазами, диабазами – Успенский массив¹⁸. Массив пространственно связан со структурой Суховского горста, имеет согласное со структурами горста простираение.

Существование скрытого интрузивного массива отмечается и по результатам анализа магнитометрических и гравиметрических данных^{19,20} [12]. Интрузия перекрывается девонскими отложениями мощностью более 4 км и находится в зоне Тугонаковской грабен-синклинали. Расположение гранитоидного комплекса вблизи шовной тектонической зоны говорит

¹³ Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка: учебник для вузов. Л.: Недра, 1979. 351 с.

¹⁴ Тараканов К.В. Отчет о результатах камеральных работ по дополнительной обработке, анализу и интерпретации геофизических данных по Барзасской площади. Новокузнецк: ООО «Геофизическое бюро», 2019.

¹⁵ Там же.

¹⁶ Куртигешев В.С., Бычков А.И., Шатилова Г.А., Скребков А.В., Ефремова Н.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-45-III (Кемерово). Объяснительная записка. СПб., 2001. 159 с.

¹⁷ Саморуков В.И., Крекова А.В., Панченко А.В. Геологический отчет по объекту «Поиски и оценка месторождений золота в отложениях симоновской свиты и меловых корях выветривания в границах лицензии КЕМ 00932 ТР (Барзасская площадь)». Кемерово: ООО «Барзасская экспедиция», 2019.

¹⁸ Там же.

¹⁹ Там же.

²⁰ Тараканов К.В. Отчет о результатах камеральных работ по дополнительной обработке, анализу и интерпретации геофизических данных по Барзасской площади. Новокузнецк: ООО «Геофизическое бюро», 2019.



о немаловажной роли интрузивного магматизма в процессе рудообразования изучаемого участка.

Проведенные работы подтверждают предположение о существовании рудоконтролирующей структуры в зоне сочленения Кузнецкой впадины и Кузнецкого Алатау. В течение длительной истории эволюции района произошло формирование структур, которые могут выполнять роль структурных ловушек, способствующих локализации месторождений [14–16]. Структуры-ловушки могут быть представлены парными разломами (как параллельными, так и смыкающимися), крутопадающими зонами разрывных нарушений, контактами интрузивных тел. Как правило, появление золоторудных тел обусловлено одновременным влиянием структурных ловушек сразу нескольких типов, одна из которых признается главной рудоконтролирующей и рудовмещающей.

Выделенная на геоэлектрическом разрезе крутопадающая проводящая зона является поисковым критерием золоторудных проявлений наряду с проявлениями интрузивного магматизма. Локальная неоднородность, выделенная в зоне сочленения крупных геологических этажей, означает, что рассматриваемый участок представляет собой не только тектоническую зону, но и канал, осуществляющий связь между различными глубинными уровнями, откуда поступали рудоносные растворы.

Рудоконтролирующие структуры Кузнецкого Алатау пространственно связаны с субвертикальными разломами фундамента, что может свидетельствовать о крупнообъемных залежах из-за благоприятных условий для длительной циркуляции рудоносных растворов и последующего рудоотложения [15, 17, 18]. Ярким примером таких структур служит Сухоложское рудное поле, месторождения Мурунтау и Павлик, характеризующиеся глубинными источниками поступления вещества [15, 17, 19, 20].

Заключение

В общем комплексе геофизических методов особое место занимает метод магнитотеллурического зондирования, позволяющий получать информацию о глубинном строении

литосферы Земли. В настоящее время на территории Кузнецкой впадины и Кузнецкого Алатау преимущественно изучается верхняя часть рудоконтролирующих структур (первые сотни метров), тогда как основная их часть остается неизученной. По этой причине для изучения особенностей строения разреза земной коры Кельбес-Золотокитатского района и их связи с проявлениями золотоносного оруденения был выбран метод магнитотеллурических зондирования.

По результатам анализа геоэлектрического разреза выделена крутопадающая аномальная область низкого УЭС, которую мы связываем с зоной эндогенных каналов флюидно-магматической переработки пород протерозойского фундамента, ограниченной глубокопроникающими разломными зонами. Рудоконтролирующая структура имеет форму крутопадающей колонны, расширяющейся с глубиной. Используемая методика съемки не позволяет надежно разделить влияние разломных зон и рудогенерирующей структуры. Тем не менее понижение значений УЭС до 15 Ом·м в пределах тектонически ослабленной зоны (30 Ом·м) свидетельствует в пользу существования в этой области флюидных систем рудопереноса или рудогенерации.

Также значимым результатом проведенного исследования является обнаружение признаков интрузивного магматизма на территории Кузнецкой впадины. Глубина залегания кровли интрузивного тела составляет 5 км, что сопоставимо с данными гравиметрических и магнитных исследований.

На базе комплексного анализа гравиметрических, магнитометрических и магнитотеллурических результатов исследований глубинного строения земной коры составлено представление о глубинной модели зоны сочленения Кузнецкого прогиба и Камжелинского блока Кузнецкого Алатау. Выделены глубинные факторы, характеризующие условия формирования рудоносных структур. Зона водораздела рек Конюхты и Сухой отмечена в качестве перспективной области для дальнейших исследований с целью поиска и локализации золоторудного месторождения по детальной сети наблюдений. Полученная информация имеет как фундаментальное, так



и практическое значение. Геоэлектрический разрез вносит вклад в понимание формирования эндогенных флюидных систем, в то же

время он выполняет роль поискового критерия рудных месторождений Кузнецкого Алатау.

Список источников

1. Алабин Л.В., Калинин Ю.А. Металлогения золота Кузнецкого Алатау / науч. ред. Г.В. Поляков. Новосибирск: Изд-во НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999. 237 с.
2. Платонов А.Н., Санин В.Н., Аввакумов А.Е. Геологическое строение и золотоносность Кельбес-Золотокитатского района // Руды и металлы. 1998. № 2. С. 36–46. <https://elibrary.ru/hvaxfd>.
3. Гусев В.А., Нестеренко Г.В., Жмодик С.М., Белянин Д.К. Два типа ассоциаций минералов платиновой группы в золотоносных россыпях северо-западной части Кузнецкого Алатау // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 19–32. <https://elibrary.ru/yikmhf>, <https://doi.org/10.17223/25421379/14/2>.
4. Черных А.И. Геолого-минерогеническое картирование на золото масштаба 1:500000 Северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области (задачи, методика, результаты) // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 1. С. 16–22. <https://elibrary.ru/khgyhz>.
5. Зимоглядов Б. Н. Генетические типы коренных источников золота и связь с ними россыпей в Кузнецком Алатау // Известия Томского политехнического института. 1970. Т. 239. С. 363–367.
6. Колпаков В.В., Нестеренко Г.В., Неволько П.А., Жмодик С.М. Минералого-геохимическая характеристика и вероятные коренные источники самородного золота россыпей Кельбес-Золотокитатского района (северная часть Кузнецкого Алатау) // Геосферные исследования. 2021. № 3. С. 42–55. <https://elibrary.ru/uwxucu>, <https://doi.org/10.17223/25421379/20/3>.
7. Поспеева Е.В. Природа глубинной электропроводности и связь коровых аномалий с месторождениями полезных ископаемых // Материалы VIII Всерос. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (г. Москва, 4–7 октября 2021 г.). М.: Изд-во Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2021. С. 35–41. <https://elibrary.ru/aiknzn>.
8. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.
9. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики: монография / пер. с англ. М.: Научный мир, 2009. 679 с.
10. Кадик А.А. Флюиды литосферы как отражение окислительно-восстановительного режима в мантии: следствия для геофизических свойств глубинного вещества // Флюиды и геодинамика: материалы Всерос. симпозиума «Глубинные флюиды и геодинамика» (г. Москва, 19–21 ноября 2003 г.). М.: Наука, 2006. С. 19–46.
11. Mustafaev A.A., Gertner I.F., Ernst R.E., Kolmakov Y.V., Serov P.A. The Paleozoic-aged University foidolite-gabbro pluton of the northeastern part of the Kuznetsk Alatau Ridge, Siberia: geochemical characterization, geochronology, petrography and geophysical indication of potential high-grade nepheline ore // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 12. P. 1128. <https://elibrary.ru/wmxneh>, <https://doi.org/10.3390/min10121128>.
12. Zaplavnova A.A., Esin E.I., Olenchenko V.V. Potential fields study in the Kelbes-Zolotokitat ore cluster // X International Siberian Early Career GeoScientists Conference: proceedings of the conference (Novosibirsk, 13–17 June 2022). Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2022. P. 226–227. <https://elibrary.ru/nstpzq>.
13. Довгаль В.Н., Широких В.А. История развития магматизма повышенной щелочности Кузнецкого Алатау / отв. ред. Ю.А. Кузнецов. Новосибирск: Наука, 1980. 216 с.
14. Некрасов Е.М. Поиск «слепых» золоторудных тел жильного типа // Руды и металлы. 2018. № 3. С. 55–71. <https://elibrary.ru/mnfwxp>, <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10007>.
15. Савчук Ю.С., Волков А.В. Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия // Литосфера. 2019. Т. 19. № 6. С. 813–833. <https://elibrary.ru/jfdwio>, <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-6-813-833>.
16. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 1. С. 80–86. <https://elibrary.ru/rwqliz>.
17. Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов В.В. Структурно-динамические условия формирования крупных орогенных месторождений золота Центральной и Северо-Восточной Азии // Литосфера. 2021. Т. 21. № 3. С. 349–364. <https://elibrary.ru/gmzkzb>, <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-3-349-364>.
18. Ненашева Р.И., Рогова Т.Б., Энхбаяр Б., Чебоксаров Б.Б. Закономерности размещения золоторудных месторождений на северной и центральной частях Кузнецкого Алатау // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 21–27. <https://elibrary.ru/pwlrz>.
19. Петрова А.А., Копытенко Ю.А. Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерогенической зоны северного Забайкалья // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2019. № 1. С. 37–53. <https://elibrary.ru/ujocwm>, <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53>.
20. Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов В.В., Сидоров В.А., Лямин С.М. Строение и состав золоторудных залежей месторождения Павлик // Руды и металлы. 2018. № 2. С. 77–85. <https://elibrary.ru/xscdyd>.



References

1. Alabin L.V., Kalinin Yu.A. *Kuznetsk Alatau gold metallogeny*. Novosibirsk: United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy SB RAS; 1999. 237 p. (In Russ.).
2. Platonov A.N., Sanin V.N., Awakumov A.Ye. Geological structure and gold-bearing zones of the zolotokitatsky district. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 1998;2:36-46. (In Russ.). <https://elibrary.ru/hvaxfd>.
3. Gusev V.A., Nesterenko G.V., Zhmodik S.M., Belyanin D.K. Two types of platinum group minerals assemblages from the gold-bearing placers of northwest Kuznetsk Alatau. *Geosfernye issledovaniya = Geosphere Research*. 2020. № 1. S. 19–32. (In Russ.). <https://elibrary.ru/yikmhf>, <https://doi.org/10.17223/25421379/14/2>.
4. Chernykh A.I. Geologic-minerogenic mapping of gold with scale 1:500000 of the northwest part of Altai-Sayanskaya folded area (problems, technique, results). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2009;314(1):16-22. (In Russ.). <https://elibrary.ru/khgyhz>.
5. Zimoglyadov B.N. Genetic types of primary sources of gold and their relationship with Kuznetsk Alatau placers. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta = Bulletin of the Tomsk Technological Institute*. 1970;239:363-367. (In Russ.).
6. Kolpakov V.V., Nesterenko G.V., Nevolko P.A., Zhmodik S.M. Mineralogical-geochemical characteristic and the potential ore sources of placer native gold in Kelbes-Zolotokitatsky region (north Kuznetsk Alatau). *Geosfernye issledovaniya = Geosphere Research*. 2021;3:42-55. (In Russ.). <https://elibrary.ru/uwxucu>, <https://doi.org/10.17223/25421379/20/3>.
7. Pospeeva E.V. The nature of deep electrical conductivity and the relationship of crustal anomalies with mineral deposits. In: *Materialy VIII Vseros. shkoly-seminara po elektro-magnitnym zondirovaniyam Zemli im. M.N. Berdichevskogo i L.L. Van'yana = Materials of the 8th All-Russian school-seminar on electromagnetic sounding of the Earth named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan*. 4–7 October 2021, Moscow. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS; 2021, p. 35–41. (In Russ.). <https://elibrary.ru/aiknzn>.
8. Berdichevskii M.N., Dmitriev V.I., Novikov D.B., Pasutsan V.V. *Analysis and interpretation of magnetotelluric data*. Moscow: Dialog-MGU; 1997. 161 p. (In Russ.).
9. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and Methods of Magnetotellurics; 2008. 564 p. (Russ. ed.: *Modeli i metody magnitotelluriki: monografiya*. Moscow: Nauchnyi mir; 2009. 679 p.).
10. Kadik A.A. Lithospheric fluids as a reflection of the redox regime in the mantle: consequences for the geophysical properties of deep matter. In: *Flyuidy i geodinamika: materialy Vseros. simpoziuma "Glubinnye flyuidy i geodinamika" = Fluids and geodynamics: materials of the All-Russian Symposium "Deep fluids and geodynamics"*. 19–21 November 2003, Moscow. Moscow: Nauka; 2006, p. 19–46. (In Russ.).
11. Mustafaev A.A., Gertner I.F., Ernst R.E., Kolmakov Y.V., Serov P.A. The Paleozoic-aged University foidolite-gabbro pluton of the northeastern part of the Kuznetsk Alatau Ridge, Siberia: geochemical characterization, geochronology, petrography and geophysical indication of potential high-grade nepheline ore. *Minerals*. 2020;10(12):1128. <https://elibrary.ru/wmxneh>, <https://doi.org/10.3390/min10121128>.
12. Zaplavnova A.A., Esin E.I., Olenchenko V.V. Potential fields study in the Kelbes-Zolotokitatsky ore cluster. In: *X International Siberian Early Career GeoScientists Conference: proceedings of the conference*. 13–17 June 2022, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2022, p. 226–227. <https://elibrary.ru/nstpzq>.
13. Dovgal' V.N., Shirokikh V.A. *Development history of the Kuznetsk Alatau magmatism of increased alkalinity*. Novosibirsk: Nauka; 1980. 216 p. (In Russ.).
14. Nekrasov E.M. Prospecting for lode-type blind gold orebodies. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2018;3:55-71. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mnfwpx>, <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10007>.
15. Savchuk Yu.S., Volkov A.V. Large and super-large orogenic golden deposits: geodynamics, structure, genetic consequences. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2019;19(6):813-833. (In Russ.). <https://elibrary.ru/jfdwio>, <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-6-813-833>.
16. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geological and geophysical conditions at Siberian golden ore fields. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2014;324(1):80-86. (In Russ.). <https://elibrary.ru/rwqliz>.
17. Savchuk Yu.S., Volkov A.V., Aristov V.V. Structural and dynamic conditions for the formation of large orogenic gold deposits in Central and Northeast Asia. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2021;21(3):349-364. (In Russ.). <https://elibrary.ru/gmzkzb>, <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-3-349-364>.
18. Nenasheva R.I., Rogova T.B., Enkhbayar B., Cheboksarov B.B. Localization patterns of gold deposits in the northern and central parts of the Kuznetsk Alatau. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2004;1:21-27. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pwlrlyz>.
19. Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Fluid systems of the Mamsko-Bodaibin mineragenic zone in north Transbaikalia. *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2019;1:37-53. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ujocwm>, <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53>.
20. Savchuk Yu.S., Volkov A.V., Aristov V.V., Sidorov V.A., Lyamin S.M. Structure and composition of gold Pavlik deposit. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2018;2:77-85. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xscdyd>.



Информация об авторах / Information about the authors



Заплавнова Анна Алексеевна,
младший научный сотрудник Лаборатории геоэлектрики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия,
✉ zaplavnovaaaa@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0775-3908>
Anna A. Zaplavnova,
Junior Researcher of the Geoelectrics Laboratory,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia,
✉ zaplavnovaaaa@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0775-3908>



Поспеева Елена Валентиновна,
ведущий научный сотрудник Лаборатории геоэлектрики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия,
✉ PospeevaEV@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>
Elena V. Pospeeva,
Leading Researcher of the Geoelectrics Laboratory,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia,
✉ PospeevaEV@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>



Оленченко Владимир Владимирович,
ведущий научный сотрудник Лаборатории геоэлектрики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия,
✉ OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>
Vladimir V. Olenchenko,
Leading Researcher of the Geoelectrics Laboratory,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia,
✉ OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 31.05.2023; одобрена после рецензирования 15.06.2023; принята к публикации 22.06.2023.

The article was submitted 31.05.2023; approved after reviewing 15.06.2023; accepted for publication 22.06.2023.



Научная статья

УДК 550.8

<https://elibrary.ru/obdobc><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-160-181>

Изучение криогидрогеологических условий с помощью электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне на примере западной части Якутского артезианского бассейна

А.А. Оцимик^{а,б}, И.В. Буддо^б^аООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск, Россия^{а,б}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^{а,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Сложность разведки, оценки запасов и эксплуатации месторождений подземных вод на территории Республики Саха (Якутия) (Россия) определяется разнообразием условий распространения и мощности многолетнемерзлых пород, а также строением отложений, вмещающих водоносные коллекторы. Актуальность представленного исследования связана с необходимостью научно обоснованного прогноза и поиска источников технического водоснабжения для их использования при бурении нефтяных скважин и обеспечения системы поддержания пластового давления. В статье изложены результаты обобщения материалов малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне, проведенных на территории Республики Саха (Якутия) в период 2016–2022 гг. Описана методика исследований, освещены предпосылки определения в геоэлектрическом разрезе многолетнемерзлых пород, а также особенности их морфологии на территориях, расположенных вдоль западной границы Якутского артезианского бассейна, с привлечением материалов бурения 75 гидрогеологических скважин. Отмечена неравномерная геотермическая изученность района. Прослежено сокращение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород с северо-востока на юго-запад от 400 до 150 м. На территории Среднеботуобинского месторождения закартировано прерывистое распространение мерзлых толщ, выявлены таликовые зоны с разной водообильностью, ряд выявленных объектов водоснабжения эксплуатируется. Картографические материалы, полученные в ходе проведенных исследований, позволили существенно детализировать строение криогидрогеологических систем ряда месторождений нефти и газа Республики Саха (Якутия). Результаты проведенных исследований имеют научно-практическое значение при прогнозе участков осложнений в ходе бурения скважин, связанных с проходкой многолетнемерзлых пород (разрушения стенок скважины, прихваты бурового инструмента, газопрооявления), а также при определении участков развития межмерзлотных и подмерзлотных водоносных коллекторов и минимизации рисков бурения гидрогеологических скважин с неудовлетворительным результатом.

Ключевые слова: мерзлота, криолитозона, термометрия, температура, талики, водоснабжение, криогидрогеологические системы, малоглубинные зондирования становлением поля в ближней зоне, удельное электрическое сопротивление, Якутия

Благодарности: Авторы выражают глубокую благодарность кандидату технических наук Ю.А. Агафонову за всестороннюю поддержку научных начинаний, доктору геолого-минералогических наук А.Г. Вахромееву за внимание и консультационную помощь при подготовке статьи. Большой объем аналитических работ выполнен специалистами ООО «СИГМА-ГЕО» И.В. Акуловой, З.Я. Масяевой, кандидатом геолого-минералогических наук И.А. Шелуховым. Всем названным лицам авторы искренне признательны.

Для цитирования: Оцимик А.А., Буддо И.В. Изучение криогидрогеологических условий с помощью электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне на примере западной части Якутского артезианского бассейна // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 160–181. <https://elibrary.ru/obdobc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-160-181>.



Original article

Cryohydrogeological settings appraisal by shallow near-field TEM sounding: a case study of the western part of the Yakut artesian basin

Anastasia A. Otsimik^{a*}, Igor V. Buddo^b

^aSIGMA-GEO LLC, Irkutsk, Russia

^{a,b}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The complexity of exploration, reserve estimation and development of groundwater fields in the Republic of Sakha (Yakutia) (Russia) is due to the variety of location conditions and thickness of permafrost rocks, as well as the structure of sediments containing aquifers. The relevance of the study is determined by the necessity to give a scientifically based prediction and search for the sources of technical water supply to be used in oil well drilling and provision of a reservoir pressure maintenance system. The article presents the analysis results of the materials of shallow near-field transient electromagnetic soundings carried out on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) in the period from 2016 to 2022. Description is given to the research methodology, conditions for determining the permafrost rocks in the geoelectric section, their morphological features in the territories located along the western border of the Yakut artesian basin with the involvement of drilling materials from 75 hydrogeological wells. The sparse geothermal knowledge of the area is noted. It was traced that the depth of the permafrost base decreases from northeast to southwest from 400 to 150 m. Within the Middle Botuoba field, discontinuous distribution of frozen strata has been mapped, talik zones with different water abundance have been identified, and a number of identified water supply facilities are operated. Cartographic materials obtained in the course of the research allowed to specify significantly the structure of cryohydrogeological systems of a number of oil and gas fields in the Republic of Sakha (Yakutia). The research results are of scientific and practical importance when predicting the areas with complicated well drilling associated with permafrost drilling (destruction of well walls, drilling tool sticking, gas shows), as well as when determining the location areas of interpermafrost and subpermafrost aquifers and minimizing the risks of drilling dry hydrogeological wells.

Keywords: permafrost, cryolithozone, thermal logging, temperature, taliks, water supply, cryohydrogeological systems, shallow near-field transient electromagnetic soundings, specific electrical resistivity, Yakutia

Acknowledgements: The authors express the profound gratitude to Yu.A. Agafonov, Ph.D. for the all-round support of scientific initiatives, A.G. Vakhromeev, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.) for attention and consulting assistance during the preparation of the article. A great amount of analytical work was carried out by the geoscientists of SIGMA-GEO LLC I.V. Akulova, Z.Ya. Masaeva, I.A. Shelokhov, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.). The authors are sincerely grateful to all these persons.

For citation: Otsimik A.A., Buddo I.V. Cryohydrogeological settings appraisal by shallow near-field TEM sounding: a case study of the western part of the Yakut artesian basin. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):160-181. (In Russ.). <https://elibrary.ru/obdobc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-160-181>.

Введение

На территории Республики Саха (Якутия) (Россия) широко распространена толща многолетнемерзлых пород, в районе исследования глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород составляет от 100 до 400 м. Мерзлота имеет различные условия распространения, мощность и динамику, что обуславливает специфичность формирования и режима подземных вод, а также различную глубину их залегания [1–4].

Зачастую на месторождениях углеводородов замеры температуры горных пород в верхней части разреза ограничиваются единичными скважинами. В то же время информация о глубине залегания и внутреннем стро-

ении многолетнемерзлых пород позволяет прогнозировать условия бурения и обнаруживать водообильные зоны, месторождения подземных вод, которые могли бы использоваться для технических целей или обеспечения системы поддержания пластового давления. Для решения данных задач предлагается применение технологии электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ), которые позволяют изучать и уточнять морфологию многолетнемерзлых пород в межскважинном пространстве.

В административном плане территории, изученные методом мЗСБ, сосредоточены преимущественно в пределах Мирнинского



улуса Республики Саха (Якутия). В структурно-тектоническом отношении¹ изученные площади относятся к Мирнинскому структурному мысу и области его сочленения с Непским сводом – структурам I порядка, осложняющим строение надпорядковой структуры – Непско-Ботуобинской антеклизы².

В данной работе рассматриваются участки детальных криогидрогеологических исследований, которые располагаются в пределах локальных положительных структур: Маччобинской, Мирнинской, Иктехской, и Среднеботуобинской. Территории исследований объединяет длительная история тектонического развития. Крупным элементом, оказавшим влияние на современный облик района, является Вилуйско-Мархинская зона разломов, пересекающая Мирнинский структурный мыс в субмеридиональном направлении.

Объектом криогидрогеологических исследований методом мЗСБ послужили отложения верхней части геологического разреза, залегающие в интервале от дневной поверхности до глубин не менее 500 м. Данный интервал включает в себя породы чарской свиты, ичерской, метегерской, бордонской и джуктинской свит кембрия. На дневной поверхности обнажаются породы нижнего ордовика и нижней юры, в речных поймах распространены четвертичные образования (рис. 1).

Территория Якутии известна своими суровыми геокриологическими условиями. Это связано с низким радиационно-тепловым режимом горных пород и особенностями природной обстановки – географическим положением.

Изученные территории относятся к Лено-Анабарской геокриологической провинции, главной особенностью которой является глубокое залегание подошвы зоны отрицательных температур – криолитозоны [5]. В вертикальном разрезе криолитозона делится на ряд слоев (рис. 2). Верхний слой мощностью от нескольких сантиметров до 3–4 м носит название сезонно-талого. Он полностью промерзает зимой и оттаивает летом. Ниже слоя сезонного протаивания залегает постоянно

мерзлый грунт, то есть собственно вечная мерзлота. Примерно до глубины 15–20 м температура мерзлых горных пород меняется в течение года. Это слой годовых теплооборотов. Температура на его подошве характеризует тепловое состояние всей мерзлой и промерзающей толщи. Ниже расположена зона постоянных постепенно повышающихся температур вплоть до ее перехода в нулевую отметку. На определенном интервале глубин возможно и понижение температур, что свидетельствует о более суровых климатических условиях в прошлом [6].

Согласно карте распространения вечной мерзлоты на территории России А.В. Павлова, Г.В. Малковой, исследуемый район располагается на границе зон сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород с температурами пород на подошве слоя годовых теплооборотов от -1 до -3 °C (рис. 3, а). В свою очередь, согласно схеме гидрогеологического районирования по Б.В. Боровицкому, территории исследования относятся к области распространения весьма мощной мерзлой зоны от 100–150 м на юго-западе Мирнинского структурного мыса в зоне его сочленения с Непским сводом до 200–250 м в пределах Маччобинского поднятия (рис. 3, б).

Согласно классификации С.В. Алексеева, территории относятся к Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системе, расположенной на юге Якутской кимберлитовой (алмазоносной) провинции в пределах Ботуобинской седловины, разделяющей Тунгусскую и Вилуйскую синеклизы [2].

Криогидрогеологические системы представляют собой совокупность взаимосвязанных водоносных, водоупорных или воздушно-сухих горных пород, образующих целостную структуру и претерпевших существенные изменения под влиянием циклических процессов криогенеза [2]. Для них характерны уменьшение гидравлической емкости, наличие криогенных водоупоров, вод сезонно-талого слоя, вод таликов и таликовых зон, над-, меж-, внутри- и подмерзлотных подземных вод, особый режим их питания и разгрузки, специфика

¹ Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. М-б 1:3500000 / под ред. В.С. Старосельцева. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2018.

² Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the Nepa-Botuoba High, Angara-Lena Terrace, and Cis-Patom Foredeep, southeastern Siberian Craton, Russia: report // Bulletin 2201-C. Washington, 2001. 16 p.

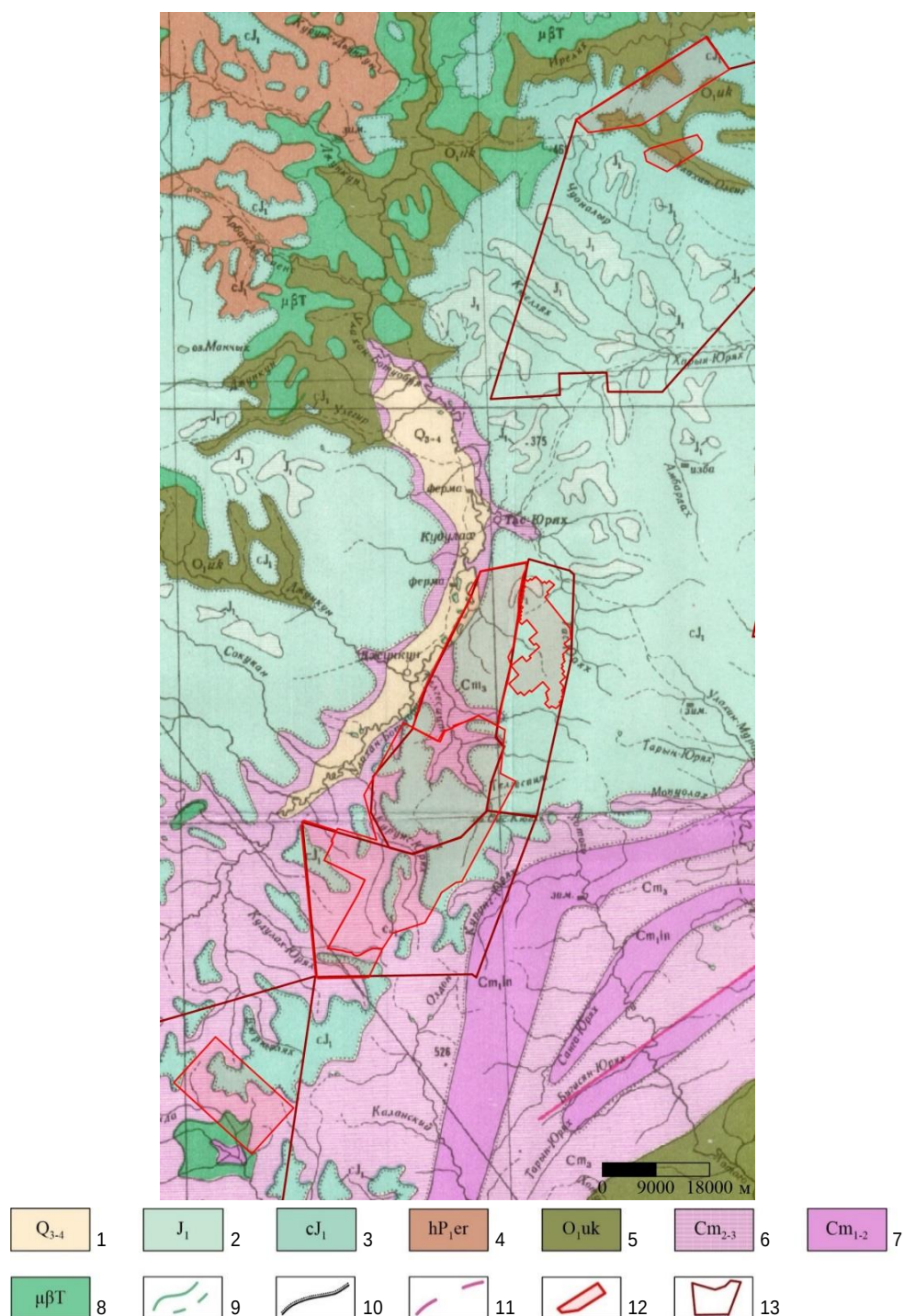


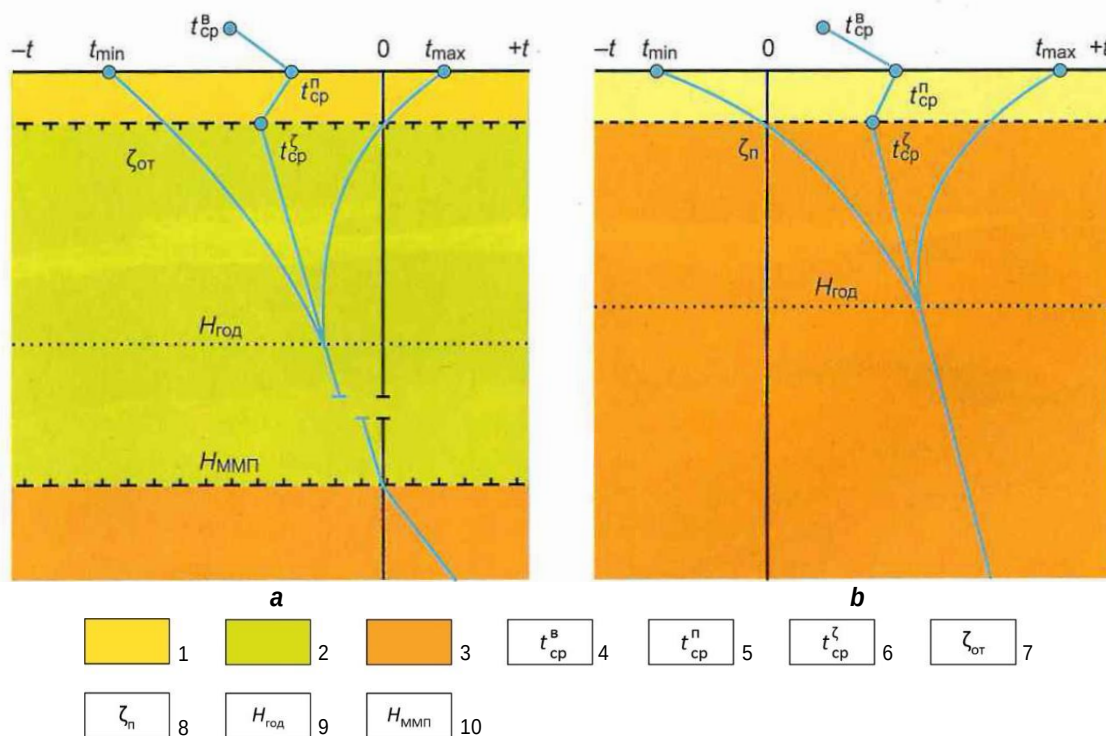
Рис. 1. Геологическая карта района исследований³:

1 – верхний и современный отделы четвертичной системы: аллювий пойм и надпойменных террас, пески, галечники, суглинки; 2 – морская свита нижнего отдела юрской системы: песчаники, глинистые сланцы, линзы известняков; 3 – нижняя континентальная свита нижнего отдела юрской системы: песчаники, пески, линзы и прослои конгломератов; 4 – ереминская свита нижнего отдела пермской системы; 5 – устькутская свита нижнего отдела ордовикской системы: доломиты, известняки, известковистые песчаники; 6 – джуктинская и бордонская свиты среднего – верхнего отдела кембрийской системы: мергели, глины, известковистые песчаники; 7 – метежерская и ичерская свиты нижнего – среднего отдела кембрийской системы: известняки, доломиты; 8 – пластовые и штокообразные интрузии траппов; 9 – линейные и кольцевые дайки траппов; 10 – контуры несогласно залегающих толщ; 11 – линии тектонических нарушений; 12 – участки детальных криогидрогеологических исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 13 – лицензионные участки

³ Геологическая карта. М-б 1:1000000. Лист Р-49 / сост. С.Ф. Павлов; ред. М.М. Одинцов. Иркутск, 1956.

**Fig. 1. Geological map of the area under investigation³:**

1 – upper and modern sections of the Quaternary System: alluvium of floodplains and terraces above floodplains, sands, pebbles, loams; 2 – marine formation of the lower part of the Jurassic System: sandstones, clay shales, limestone lenses; 3 – lower continental formation of the lower part of the Jurassic System: sandstones, sands, lenses and layers of conglomerates; 4 – Eremian Formation of the lower part of the Permian System; 5 – Ustkut Formation of the lower part of the Ordovician System: dolomites, limestones, calcareous sandstones; 6 – Dzhuktinskaya and Bordonskaya Formations of the middle-upper section of the Cambrian System: marls, clays, calcareous sandstones; 7 – Metegerskaya and Icherskaya Formations of the lower-middle section of the Cambrian system: limestones, dolomites; 8 – sheet and stock-like intrusions of traps; 9 – linear and ring dikes of traps; 10 – contours of unconformably occurring strata; 11 – lines of tectonic faults; 12 – areas of detailed cryohydrogeological studies using the shallow near-field TEM method; 13 – license areas

**Рис. 2. Распределение температуры горных пород в области многолетнего (а) и сезонного (б) промерзания [1]:**

1 – слой сезонного оттаивания (промерзания); 2 – постоянно мерзлый грунт – собственно вечная мерзлота; 3 – зона постоянных постепенно повышающихся температур; 4–6 – средние годовые температуры: 4 – воздуха, 5 – на поверхности покровов, 6 – на подошве слоя сезонного оттаивания (промерзания); 7–9 – глубина: 7 – сезонного оттаивания, 8 – сезонного промерзания, 9 – слоя годовых теплооборотов; 10 – мощность многолетнемерзлых горных пород

Fig. 2. Rock temperature distribution in the area of perennial (a) and seasonal (b) freezing [1]:

1 – layer of seasonal thawing (freezing); 2 – permanently frozen ground – permafrost; 3 – zone of constant, gradually increasing temperatures; 4–6 – average annual temperatures: 4 – air, 5 – on cover surface, 6 – at the bottom of the seasonal thawing (freezing) layer; 7–9 – depth of: 7 – seasonal thawing, 8 – seasonal freezing, 9 – layer of annual heat exchanges; 10 – thickness of permafrost rocks

химического состава, массо- и энергообмена, локализация подземного стока, частичное и полное прекращение водообмена. На протяжении всех холодных этапов развития Земли в пределах криогидрогеологических систем подземные воды и мерзлые горные породы находятся в тесной взаимосвязи и непрерывном взаимодействии.

В 2009 г. С.В. Алексеевым впервые предложены принципы систематизации и класси-

фикации криогидрогеологических систем. В своем труде «Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции» [2] автор на основе многолетних (1981–2007 гг.) теоретических, полевых и экспериментальных исследований помимо выполнения многих других задач уточнил и детально охарактеризовал геологический, геокриологический и гидрогеологический разрезы основных криогидрогеологических систем Якутской алмазо-

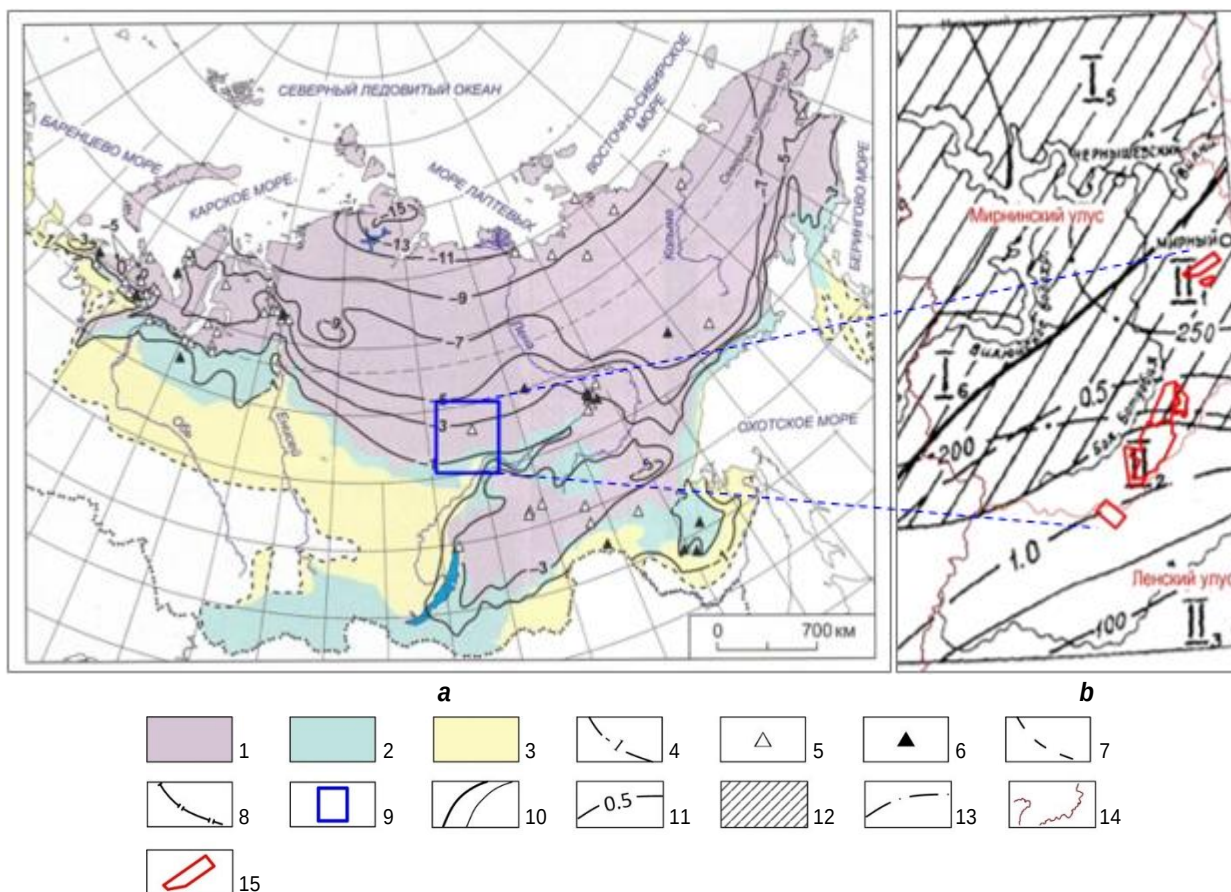


Рис. 3. Карта распространения вечной мерзлоты на территории России⁴ (а) и фрагмент схемы гидрогеологического районирования⁵ (б):

1–3 – типы вечной мерзлоты по степени прерывистости и площади распространения: 1 – сплошная (более 95 %), 2 – прерывистая (50–95 %), 3 – островная (менее 50 %); 4 – температура многолетнемерзлых пород на подошве слоя годовых теплооборотов на глубине 15–20 м, °C; 5, 6 – пункты мониторинговых наблюдений за состоянием криолитозоны: 5 – закрытые, 6 – действующие; 7 – южная граница распространения вечной мерзлоты; 8 – государственная граница Российской Федерации; 9 – район исследований; 10 – границы гидрогеологических площадей; 11 – модули подземного стока; 12 – область распространения сплошной толщи многолетнемерзлых пород; 13 – изолинии мощности многолетнемерзлых пород, м; 14 – административные границы; 15 – контуры детальных полевых исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне

Fig. 3. Map of permafrost distribution in Russia⁴ (a) and a fragment of the hydrogeological zoning scheme⁵ (b):

1–3 – types of permafrost according to the discontinuity degree and distribution area: 1 – continuous (more than 95 %), 2 – discontinuous (50–95 %), 3 – island (less than 50 %); 4 – temperature of permafrost at the bottom of the layer of annual heat transfers at the depth of 15 – 20 m, °C; 5, 6 – points of monitoring observations of the permafrost state: 5 – closed, 6 – operating; 7 – southern border of permafrost distribution; 8 – state border of the Russian Federation; 9 – study area; 10 – boundaries of hydrogeological areas; 11 – underground runoff modules; 12 – distribution area of continuous permafrost; 13 – isolines of permafrost thickness, m; 14 – administrative borders; 15 – contours of detailed field surveys by the shallow near-field TEM soundings

носной провинции, определил важнейшие этапы позднекайнозойской эволюции Анабарской, Оленек-Мархинской и Вилъю-Ботуобинской криогидрогеологических систем в связи с динамикой климата, оледенениями и дегляци-

ацией, регрессиями и трансгрессиями моря. В ходе проведенного исследования был сделан вывод о том, что Вилъю-Ботуобинская криогидрогеологическая система (как и Оленек-Мархинская) претерпевает техногенез горно-

⁴ Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск: Гео, 2005. 54 с.

⁵ Геологическая карта СССР. М-б 1:200000. Серия Верхне-Вилъюская. Лист Р-49-ХVIII / сост. Н.В. Кинд, М.П. Метелкина, В.В. Юдина; ред. А.А. Арсеньев. Объяснительная записка. М., 1990.



добывающего типа шахтного и карьерного подтипов, что приводит к серьезным нарушениям состояния и свойств горных пород, в том числе возникновению сложнопостроенного и напряженного температурного поля с большими значениями градиентов температуры, образованию мощных техногенных таликов, активизации опасных экзогенных геологических процессов [2].

Первые сведения о естественном температурном поле горных пород и мощности криолитозоны в пределах Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системы получены в конце 1950-х гг. сотрудниками Института мерзлотоведения СО АН СССР (ныне Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН) [7–9]. По результатам геотермических наблюдений в скважинах установлено, что наиболее низкую ($-3,5^{\circ}\text{C}$) температуру горные породы имеют в днище лога Хабардина. По направлению к водоразделам она повышается. Восточнее трубки «Мир» температура пород составляет $-2,3\ldots-2,5^{\circ}\text{C}$, а западнее она повышается до $-1\ldots-1,5^{\circ}\text{C}$.

Большой объем замеров температуры горных пород в неглубоких (50–200 м) скважинах выполнен сотрудниками кафедры мерзлотоведения Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. М.В. Ломоносова (ныне Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова) в начале 1960-х гг.: выявлены основные закономерности формирования и пространственной изменчивости теплового поля многолетней мерзлоты в долинах р. Вилуй, Большая и Малая Ботуобия (Улахан-и Оччугуй-Ботуобия), составлены геотемпературные карты различных масштабов. Сделан вывод о том, что при равномерной крутизне склона температура многолетнемерзлых пород изменяется последовательно, обуславливая формирование своеобразных геотемпературных зон. Температурный режим в долинах крупных рек широтного простираения отличается большей контрастностью геокриологических условий, чем при меридиональной ориентировке водных артерий [10].

Огромный вклад в изучение температурного поля горных пород Вилуйско-Ботуобинской криогидрогеологической системы внесли

исследования научного коллектива уже упомянутого выше Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Для выполнения геотермических измерений использовались скважины, пробуренные Ботуобинской геолого-разведочной экспедицией ПНО «Якуталмаз» в пределах кимберлитовых трубок «Мир», «Интернациональная», «Амакинская», «Таежная» и на расстоянии 20–50 км от них, а также ряд скважин, пройденных Среднеленской нефтегазоразведочной экспедицией ПГО «Ленанефтегазгеология» на Мирнинской, Отулахской, Нелбинской, Среднеботуобинской, Слюдякарской, Юрегинской и других газонфтяных разведочных площадях [11]. В результате исследований было изучено температурное поле горных пород, что позволило уточнить и расширить представления о тепловом состоянии мерзлых толщ, геотермическом градиенте, теплопроводности горных пород, тепловом потоке и мощности криолитозоны в Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системе [11–17].

В рамках работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района за 2007–2009 гг. Мирнинской геологоразведочной экспедицией АК «АЛРОСА» выполнялись наблюдения за температурным режимом. Цель прослеживания изменения температур по площади и во времени заключалась в выявлении взаимосвязи температурного поля с гидрогеологическими факторами. Замеры температуры проводились по 3 скважинам региональной режимной сети, 21 скважине системы обратной закачки рудника «Мир» и по 13 скважинам узла обратной закачки рудника «Интернациональный». Сделаны выводы о том, что границы залегания минимальной температуры не всегда постоянны, а изменяются во времени, что позволяет увязывать все изменения температурного поля с колебаниями температур на поверхности (в зависимости от среднемесячных и среднегодовых колебаний температур). Максимум отрицательной температуры и глубина его залегания связаны с расчлененностью рельефа. В долинах крупных рек отмечается самая низкая температура $-3,7\ldots-4,7^{\circ}\text{C}$, глубина залегания максимума – 60–80 м. На склонах и водоразделах макси-



мум отрицательной температуры составляет $-1...-2^{\circ}\text{C}$, глубина его залегания – 100–200 м, вниз по разрезу наблюдается постепенное увеличение температуры. Средняя величина геотермических градиентов по всему исследуемому разрезу составляет $0,35^{\circ}\text{C}$ на 100 м. Ниже нулевой изотермы с ростом глубины температура принимает положительные значения. Установлено, что глубина залегания многолетнемерзлых пород в районе колеблется от 164 до 490 м. Максимальная мощность пород с отрицательной температурой достигает 730–740 м и приурочена к трубкам «Мир» и «Интернациональная». Отмечена стабилизация в температурных замерах по скважинам опорной режимной сети и потепление на $0,2-0,9^{\circ}\text{C}$ по скважинам системы обратной закачки и узла обратной закачки, что связано с захоронением дренажных вод, смешанных шахтных вод и промстоков⁶.

Вопросы применения геофизических работ при поисках и разведке месторождений подземных вод были подробно освещены в 1982 г. И.М. Мельникановицким и др. в книге «Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод» [18], где особая роль была отведена исследованию месторождений в криолитозоне. Отрицательная температура, обуславливающая образование мерзлых пород, способствует существенному изменению их физических свойств. Практически это особенно заметно при проведении геоэлектрических, сейсмических и температурных исследований [18]. Авторами отмечалось широкое практическое применение методов электроразведки постоянным током – электропрофилирования, вертикальных электрических зондирования в различных модификациях. Методы электроразведки, использующие высокочастотные электромагнитные поля или неустановившиеся процессы становления электрического поля, в том числе частотного зондирования, вертикальных электрических зондирования с измерением вызванной поляризации и непосредственно зондирования становлением поля

в ближней зоне, только набирали популярность, особенно за рубежом – в Канаде и на Аляске⁷. Как отмечали авторы, практика подтверждает высокую эффективность этих методов, для которых ни слой сезонного протаивания, ни высокоомная толща многолетнемерзлых пород не являются помехой.

Материалы и методы исследования

На сегодняшний день метод мЗСБ зарекомендовал себя как эффективный способ изучения криогидрогеологических условий – многолетней мерзлоты и водоносных горизонтов в Арктической зоне России, в том числе на территории Республики Саха (Якутия). Данный метод основан на изучении электромагнитного поля, устанавливающегося в земной коре при резком изменении тока в источнике. Выключение тока в генераторной петле вызывает появление индукционных токов, распространяющихся от дневной поверхности на глубину. Становление поля представляет собой процесс затухания вихревых токов, который зависит от проводимости и геометрических параметров слоев. Затухающие вихревые токи создают вторичное магнитное поле, а его скорость изменения во времени измеряется с помощью приемных датчиков [19, 20].

Малоглубинные электроразведочные работы методом мЗСБ позволяют изучить геоэлектрическое строение разреза до глубин порядка 500 м, а затем на основе петрофизических закономерностей и данных бурения скважин увязать геоэлектрические горизонты с теми или иными геологическими, гидрогеологическими объектами и проследить их распространение по площади и в разрезе. Данная методика апробирована и применяется на северных, арктических территориях Западной и Восточной Сибири. Общий объем исследований на территории Восточной Сибири на сегодняшний день составляет 108059 физических наблюдений, из них на территории Республики Саха (Якутии) – 27282 физических наблюдений.

⁶ Власова Т.А. Отчет о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории за 2007 – 2009 гг. (режимная партия). Мирный, 2010. 165 с.

⁷ McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN-7. Missasauga: Geonics Limited, 1980. 17 p.



Предпосылки криогидрогеологического картирования многолетнемерзлых пород и обнаружения обводненных таликов по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне. Возможность картирования многолетнемерзлых пород и прогнозирования водообильных таликовых зон по данным мЗСБ основана на высокой контрастности пород в мерзлом и талом состояниях [21]. При замерзании сопротивление горных пород существенно возрастает, так как свободная вода становится практически изолятором, а электропроводность определяется лишь связанной водой, которая замерзает при очень низких температурах (ниже -50°C).

Возрастание удельных электрических сопротивлений (УЭС) при замерзании пород различно: в несколько раз оно увеличивается у

глин, до 10 раз – у скальных пород, до 100 раз – у суглинков и супесей и до 1000 и более раз – у песков и грубообломочных пород (рис. 4).

Многолетнемерзлые породы и породы сезонного промерзания сильно охлаждены и имеют повышенную льдистость, что определяет высокие значения электрического сопротивления и может служить индикатором для выявления многолетнемерзлых пород, проявляясь в числе прочего на результатах измерений в виде кратковременных процессов индукционно вызванной поляризации (ВПИ). Известно, что ВПИ может быть связана с разнообразными объектами: вкраплением в ионопроводящую среду электронно-проводящих минералов, системы пор разного диаметра с содержащимися в них водными растворами электролитов, «привязанными к стенкам пор

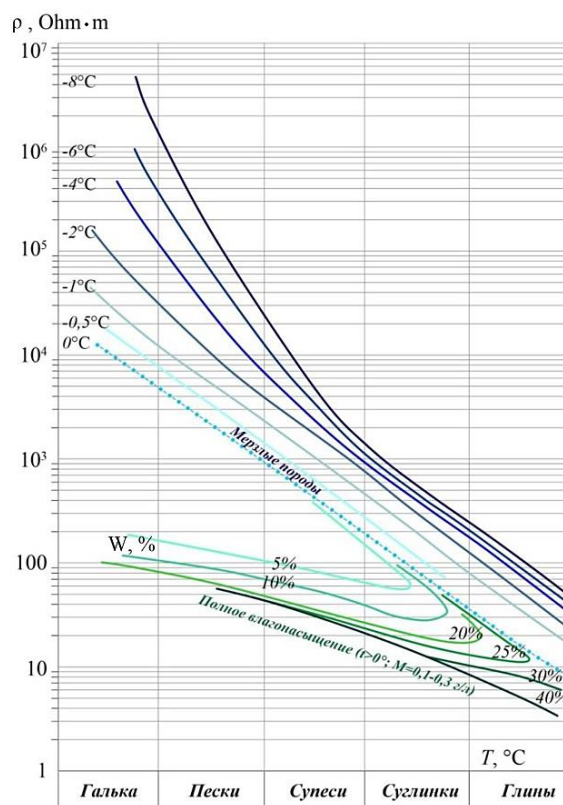


Рис. 4. Приближенная зависимость удельного электрического сопротивления многолетнемерзлых пород от состава и температуры, а также удельного электрического сопротивления талых пород от состава и влажности⁸:

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; W – влажность горных пород, %

Fig. 4. Approximate dependence of the permafrost rock specific electrical resistivity on rock composition and temperature, and dependence of the specific electrical resistivity of thawed rocks on rock composition and moisture content⁸:

ρ – specific electrical resistivity, Ohm·m; T – temperature, $^{\circ}\text{C}$; W – moisture content of rocks, %

⁸ Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.Я. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке. М.: Стройиздат, 1987. 88 с.



и поверхности глинистых частиц двойными электрическими слоями, включениями льда» [22]. На территории Якутии ВПИ связывается с распространением многолетнемерзлых глин юрского и верхнепалеозойского возрастов [23].

Области развития талых пород на геоэлектрических разрезах, напротив, проявляются в виде различной конфигурации «врезов», относительных проводников электрического тока в первые десятки Ом·м в однородный массив мерзлых (высокоомных) пород. Так, по данным Т.Я. Карпенко 1976 г., песчаные отложения таликовых зон Центральной Якутии при температуре около 0 °С и пористости 35–42 % характеризуются сопротивлением, меняющимся от 70–80 до 20–25 Ом·м, при минерализации, варьирующей от 0,5 до 3 г/л [18]. Кроме того, талые породы сопровождаются пониженными показаниями или отсутствием эффектов ВПИ на кривых мЗСБ.

По данным мЗСБ, на изученных территориях многолетнемерзлые породы сопровождаются повышенными значениями сопротивления, образуют контрастную геоэлектрическую границу между мерзлыми породами с УЭС более 100–500 Ом·м и охлажденными терригенными образованиями верхоленской серии (джуктинской и бордонской свит) с УЭС 10–60 Ом·м (рис. 5).

По данным геофизических исследований глубоких разведочных скважин, фиксируемая толща сопровождается максимумами диаметра скважины и акустического каротажа. В приведенном ниже примере отмечается увеличение диаметра скважины до 300–450 мм (при номинальном диаметре 219 мм), а также максимумы показаний акустического каротажа до 400–500 мкс/м. В 1976–1977 гг. Б.В. Володько и А.М. Мусиным установлено, что при бурении мерзлых пород диаметр скважины резко меняется вследствие вытаивания льдистых образований, в то время как в талых породах он сохраняется сравнительно постоянным [18].

Нижележащие породы также могут относиться к зоне отрицательных температур, представляя собой ярус охлажденных пород, глубину залегания подошвы которого достоверно возможно определить лишь при проведении термометрии с соблюдением «выстой-

ки» скважины. По материалам термокаротажа известно, что в северной части Мирнинского структурного мыса толщина распространения зоны отрицательных температур составляет 500–600 м, наибольших значений 730–740 м она достигает в районе кимберлитовых трубок «Мир» и «Интернациональная».

Результаты детализации строения многолетнемерзлых пород на примере объектов детальных исследований в западной части Якутского артезианского бассейна. Картирование яруса многолетнемерзлых пород имеет практическое значение при прогнозировании условий бурения, поскольку льдистые породы могут приводить к осложнениям в виде разрушения стенок скважины, прихватов бурового инструмента, газопроявлений. Для изучения глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород использовались материалы бурения гидрогеологических скважин.

Большой объем данных по 37 скважинам имеется на севере и северо-востоке района исследований по результатам региональной оценки режима, динамики, ресурсов и баланса подземных вод на территории Западной Якутии, в том числе контроля за использованием и охраной подземных вод 1986–1990 гг. (ПГО «Якутскгеология»), а также мониторинговых исследований Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории 2007–2009 гг. (АК «АПРОСА»).

Поскольку объектами исследований мЗСБ являются нефтегазоперспективные территории или действующие месторождения, важно заметить, что на сегодняшний день среди месторождений углеводородов наиболее изученным температурными исследованиями в скважинах является Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение, на котором фонд скважин, охарактеризованных термометрией, составляет не менее 30, «выстойка» скважин составляет от трех суток. Такие данные позволяют получить приближенное представление о глубине залегания многолетнемерзлых пород, но не о естественной температуре, так как тепловой режим после бурения и испытания не стабилизирован.

В области криолитозоны бурение с промывочными жидкостями ведет к значительному отеплению горных пород вокруг скважины –

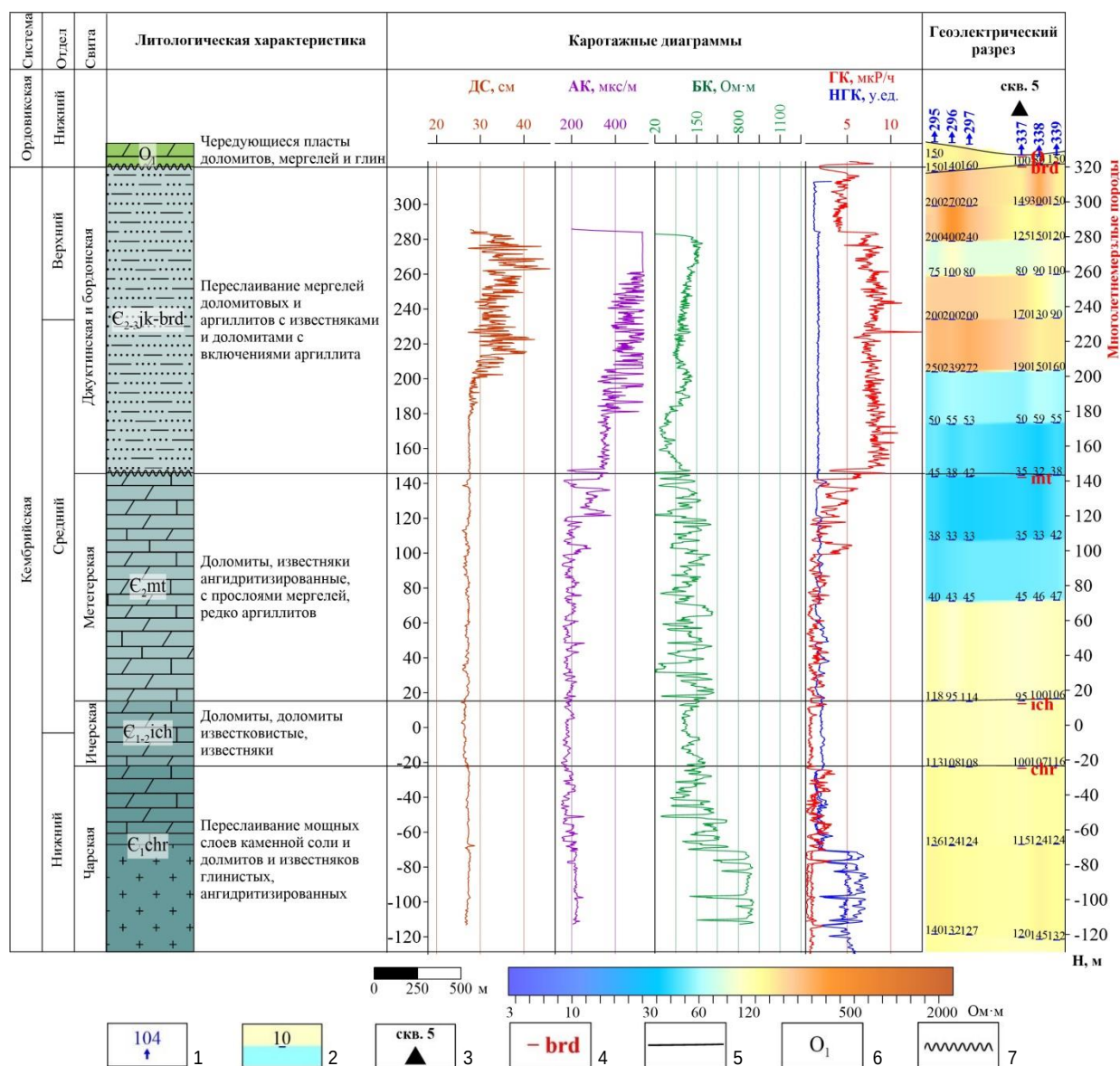


Рис. 5. Отображение многолетнемерзлых пород в геофизических полях по данным геофизических исследований скважин и малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне:

1 – пункты малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 2 – геоэлектрические слои и значения продольного сопротивления, Ом·м; 3 – скважина глубокого бурения; 4 – стратиграфические отбивки в скважине; 5 – границы стратиграфических комплексов; 6 – стратиграфические индексы; 7 – перерывы в осадконакоплении

Fig. 5. Permafrost rocks imaging in geophysical fields according to well logging and shallow near-field TEM sounding data:

1 – points of shallow near-field TEM sounding; 2 – geoelectric layers and values of longitudinal resistivity, Ohm·m; 3 – deep-hole well; 4 – stratigraphic toppings in the well; 5 – boundaries of stratigraphic complexes; 6 – stratigraphic indices; 7 – sedimentation breaks

настолько сильному, что на термограмме, снятой сразу после окончания бурения, мерзлая толща с отрицательными температурами не проявляется (рис. 6, кривая 1). В зависимости от длительности и характера бурения температура оказывается завышенной на 2–8 °С, а градиент – заниженным на 30–60 % по сравнению с их равновесными значениями. Про-

цесс восстановления нарушенного теплового режима мерзлых горных пород предполагает три основных этапа: понижение температуры до точки замерзания трещинно-поровой воды, промерзание оттаявших вокруг скважины пород, восстановление естественной отрицательной температуры мерзлых горных пород [24].

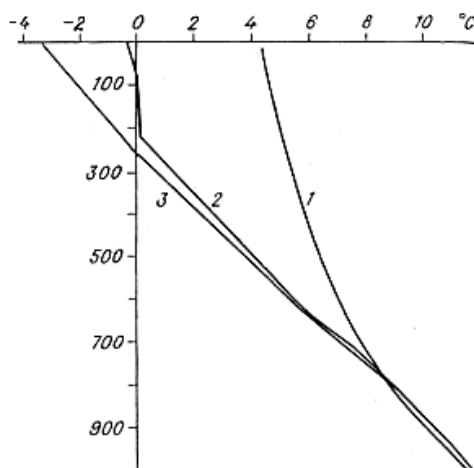


Рис. 6. Стадии восстановления температурного режима скважины после бурения [24]:

1 – сразу после окончания бурения; 2 – в период промерзания оттаявшего слоя;

3 – равновесное температурное состояние

Fig. 6. Stages of temperature regime restoration in the well after drilling [24]:

1 – immediately after the completion of drilling; 2 – during the freezing period of the thawed layer;

3 – equilibrium temperature state

Длительность первого этапа невелика (несколько дней), так как нарушенное тепловое поле резко нестационарно и быстро восстанавливается при прекращении действия теплового источника. Наиболее длительным является процесс промерзания пород вокруг скважины, требующий большого количества холода, поступающего из мерзлой толщи. Полная тепловая «выстойка» скважины наступает только после промерзания всего оттаявшего вокруг скважины слоя пород. Общее время восстановления нарушенного теплового равновесия зависит от скорости циркуляции и температуры бурового раствора, льдистости, температуры и тепловых свойств горных пород, времени бурения скважины. Согласно В.Т. Балобаеву и др., в среднем можно считать, что в мерзлой осадочной толще температура в скважине выстаивается в пять раз дольше времени ее бурения. Дольше всего восстанавливается температура вблизи нижней фазовой границы, так как в этой области запасы холода минимальны, а протаивание пород при бурении максимально [24].

Как отмечалось ранее, согласно данным мЗСБ, распространение мерзлых пород фиксируется по высоким значениям УЭС в сотни Ом·м и проявлению быстротекающих процессов ВПИ. Полученная по данным мЗСБ информация о геоэлектрическом строении позволила отследить особенности строения криогидрогеологических систем, в том числе мно-

голетней мерзлоты, и размещения водоносных горизонтов в пределах локальных структур Мирнинского структурного мыса и прилегающих территорий.

В пределах Маччобинского локального поднятия на севере Мирнинского структурного мыса, согласно данным мЗСБ, фиксируется неоднородное строение высокоомной толщи, связанной с мерзлыми породами, которая состоит из двух, иногда трех слоев (рис. 7). Верхний слой характеризуется УЭС 100–350 Ом·м, охватывает нижнеюрские, нижнеордовикские отложения и верхние горизонты верхоленского комплекса (джуктинской и бордонской свит) среднего – верхнего кембрия. Глубина залегания подошвы верхнего слоя изменяется от 80 до 200 м. Внутри верхнего слоя встречаются маломощные линзы пород с пониженными значениями УЭС в первые десятки Ом·м. Линзы располагаются под речными долинами и свидетельствуют о наличии талых пород. Данные локальные объекты на территории бурением не изучены.

На отдельных участках верхний слой подстилается проводящим интервалом с УЭС 10–20 Ом·м и мощностью 20–50 м в бордонской свите. Пониженные значения УЭС в данном интервале могут быть связаны как с увеличением глинистой составляющей в составе пород, так и с присутствием в разрезе многолетнемерзлых пород минерализованных подземных вод отрицательной температуры. В ряде

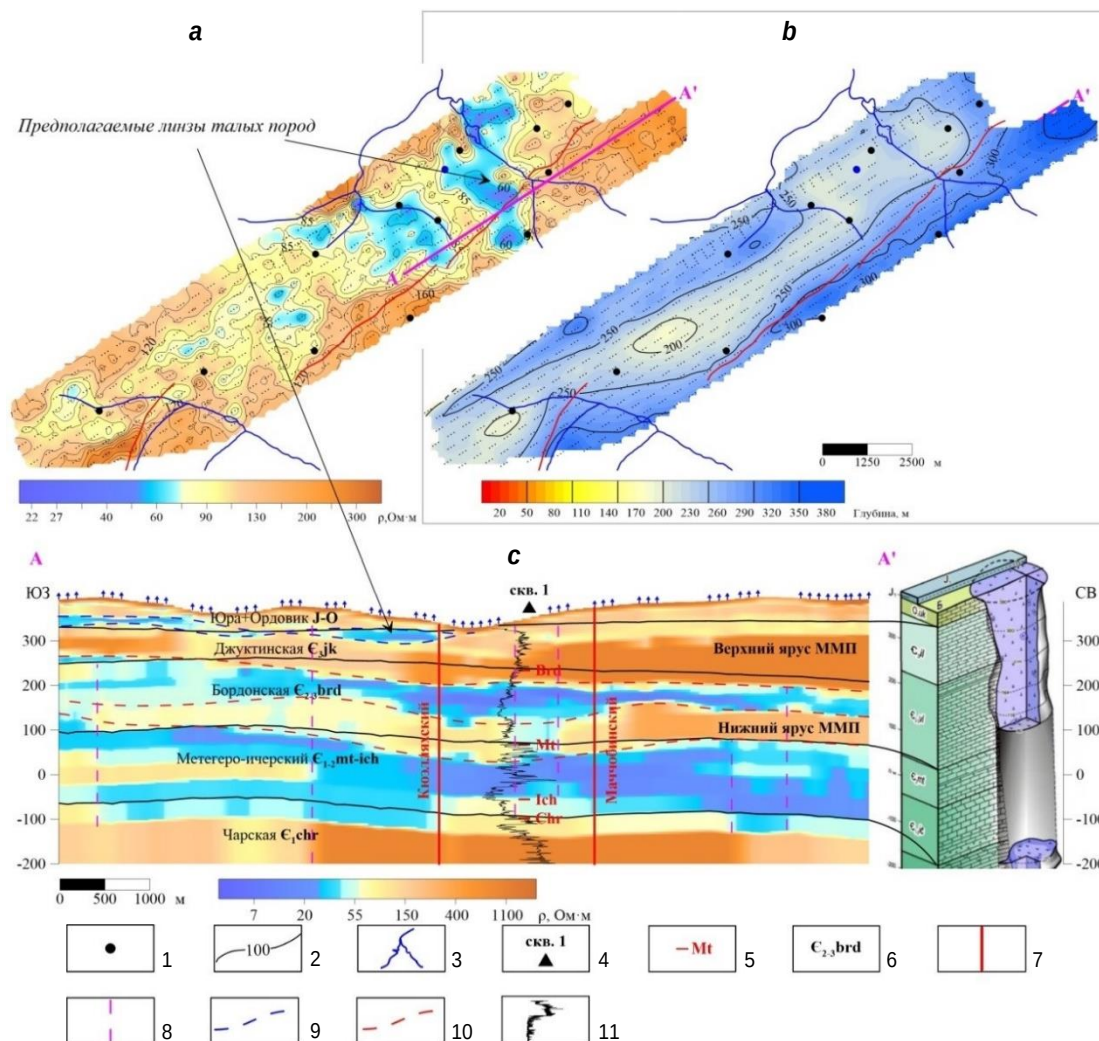


Рис. 7. Определение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород на одном из объектов детальных исследований криогидрогеологического строения в южной части Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системы:

а – отображение зон развития талых пород среди юры, ордовика и верхнего кембрия на карте параметра удельного электрического сопротивления; б – результирующая карта глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород; с – отображение в разрезе верхней части осадочного чехла водоупорных и водопроводящих пород по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне: 1 – скважины глубокого бурения; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м / изогипсы подошвы многолетнемерзлых пород, м; 3 – гидросеть; 4 – скважина глубокого бурения; 5 – стратиграфические отбивки в скважинах; 6 – индексы стратиграфических подразделений; 7 – тектонические нарушения, известные по данным сейсморазведки; 8 – тектонические нарушения, предполагаемые по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 9 – границы горизонтов с пониженными значениями сопротивления по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 10 – границы слоев с повышенными значениями сопротивления, связанных с многолетнемерзлыми породами по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 11 – диаграмма бокового каротажа

Fig. 7. Determination of the permafrost base depth at one of the objects of detailed studies of the cryohydrogeological structure in the southern part of the Vilyui-Botuoba zone of the cryohydrogeological system:

а – display of thawed rock development zones among the Jurassic, Ordovician and Upper Cambrian on the map of the specific electrical resistance parameter; б – resulting map of the permafrost base depth; с – display in the section of the upper part of the sedimentary cover of water-resistant and water-conducting rocks according to the data of shallow near-field TEM soundings:

1 – deep-hole wells; 2 – isolines of longitudinal resistivity, Ohm·m / isohypses of the permafrost base, m; 3 – hydrogeological network; 4 – a deep-hole well; 5 – stratigraphic topplings in wells; 6 – indices of stratigraphic units; 7 – tectonic faults known from seismic survey data; 8 – tectonic faults, assumed according to the shallow near-field TEM sounding data; 9 – boundaries of the horizons with reduced resistivity values according to the shallow near-field TEM sounding data; 10 – boundaries of layers with increased resistance values associated with permafrost rocks according to the shallow near-field TEM sounding data; 11 – lateral logging diagram



скважин района среди пород среднего – верхнего кембрия вскрываются трещинно-пластовые напорные воды. Величина напоров составляет от 20 до 80 м, глубина залегания – от 82 до 209 м. Воды в них сульфатно-хлоридные натриевые, минерализация – 13–32 г/л.

Второй слой высокоомных пород картируется на глубинах 240–380 м и обладает мощностью 30–100 м, с его подошвой связывается подошва многолетнемерзлых пород. Погружение подошвы и увеличение общей мощности многолетнемерзлых пород картируется вдоль простирания глубинных региональных разломов Вилуйско-Мархинского комплекса северо-восточного простирания. В 1–2 км к северо-востоку от площади известно несколько кимберлитовых трубок, внедрявшихся в доюрское время по данной системе разломов. Наибольшая глубина залегания подошвы мерзлоты 330–380 м зафиксирована, согласно результатам электроразведочных исследований, в северо-восточной оконечности площади в непосредственной близости от поля кимберлитовых трубок.

Таким образом, на самой северной из изученных площадей Якутии в пределах Маччобинского локального поднятия мерзлота охватывает нижнеюрские и нижнеордовикские отложения, джуктинскую и бордонскую свиты среднего – верхнего кембрия практически на всю мощность (см. рис. 7), глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород варьирует в пределах 240–380 м. Полученные данные согласуются с результатами мониторинговых исследований Мало-Ботуобинского алмазоносного района⁹, согласно которым мощность многолетнемерзлых пород здесь может достигать 300–400 м, а температура – -2,3...-2,7 °С.

На основе использования имеющейся информации по 75 гидрогеологическим скважинам и 9 площадям детальных криогидрогеологических исследований методом мЗСБ была составлена общая карта глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород, демонстрирующая в числе прочего неравномерность геотермической изученности района (рис. 8). В зонах отсутствия скважинной ин-

формации был использован тренд со схемы гидрогеологического районирования по Б.В. Боровицкому¹⁰. Полученная карта согласуется с региональными представлениями, в частности с тенденцией к увеличению мощности многолетнемерзлых пород в северо-восточном направлении.

Полученные материалы позволяют существенно уточнить морфологию многолетнемерзлых пород в межскважинном пространстве, при детальном рассмотрении выявить в разрезе водоносные таликовые зоны и рекомендовать их изучение гидрогеологическими скважинами (рис. 9).

В направлении с северо-востока на юго-запад мощность многолетнемерзлых пород и глубина залегания их подошвы постепенно сокращаются (см. рис. 9, а–е).

На юго-западе изучаемой территории (в зоне сочленения Мирнинского выступа и Непского свода) в разрезе сохраняется лишь верхний высокоомный слой многолетнемерзлых пород с УЭС 100–250 Ом·м, он охватывает верхнюю часть бордонской свиты, сохранившиеся маломощные образования юры и ордовика, а также четвертичные отложения, развитые по долинам рек. Мощность многолетнемерзлых пород здесь подчиняется геоморфологическим особенностям территории – достигает 140–200 м на водораздельных поверхностях, уменьшается до первых десятков метров в долинах рек и сокращается до полного отсутствия в участках развития сквозных таликов. Примером является сквозной талик в долине руч. Кудулах. Удельный дебит притока составляет 2 л/с, воды слабоминерализованные до 2,1 г/л, используются для технических нужд. Происхождение данного талика предположительно связывается с тектоническим нарушением, пересекающим долину, способствующим отепляющему действию восходящих подземных вод, разгружающихся в водоток. Сквозной талик приурочен к терригенным отложениям верхоленского комплекса (бордонской свиты), которые на преобладающей части территории заморожены до глубин 140–200 м.

⁹ Власова Т.А. Отчет о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории за 2007 – 2009 гг. (режимная партия). Мирный, 2010. 165 с.

¹⁰ Геологическая карта СССР. М-б 1:200000. Серия Верхне-Вилуйская. Лист Р-49-ХVIII / сост. Н.В. Кинд, М.П. Метелкина, В.В. Юдина; ред. А.А. Арсеньев. Объяснительная записка. М., 1990.

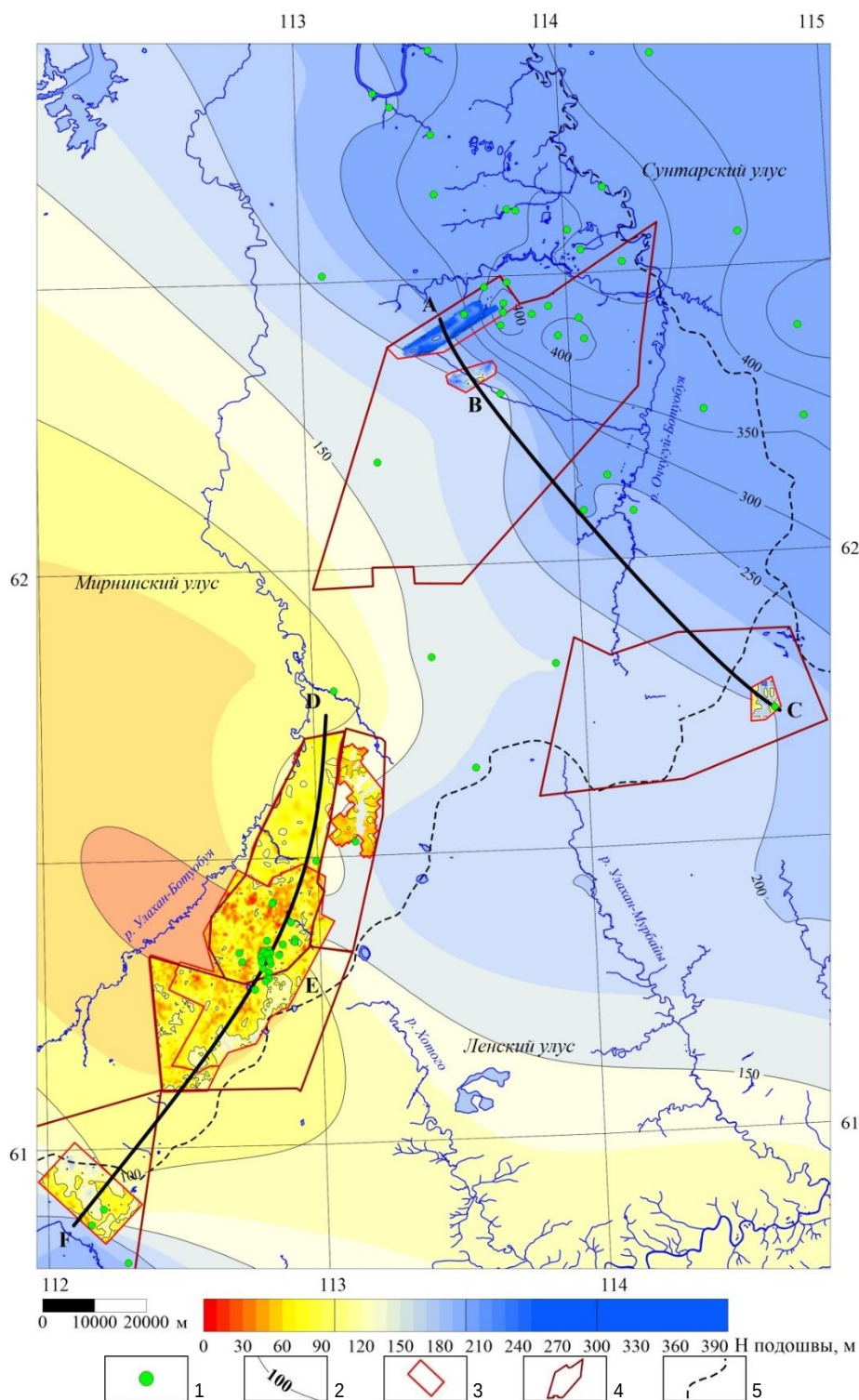


Рис. 8. Результирующая карта глубин залегания подошвы многолетнемерзлых пород по данным гидрогеологических скважин и криогидрогеологических исследований с применением малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне:

1 – гидрогеологические скважины с замераами мощности многолетнемерзлых пород и гидрогеологических параметров водоносных горизонтов; 2 – изогипсы подошвы многолетнемерзлых пород, м; 3 – контуры работ малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 4 – контуры лицензионных участков; 5 – административные границы

Fig. 8. Resulting map of permafrost base depths according to the data of hydrogeological wells and cryohydrogeological studies by shallow near-field TEM sounding:

1 – hydrogeological wells with measured permafrost thickness and hydrogeological parameters of aquifers; 2 – isohypses of the permafrost base, m; 3 – contours of the shallow near-field TEM soundings; 4 – contours of licensed areas; 5 – administrative boundaries

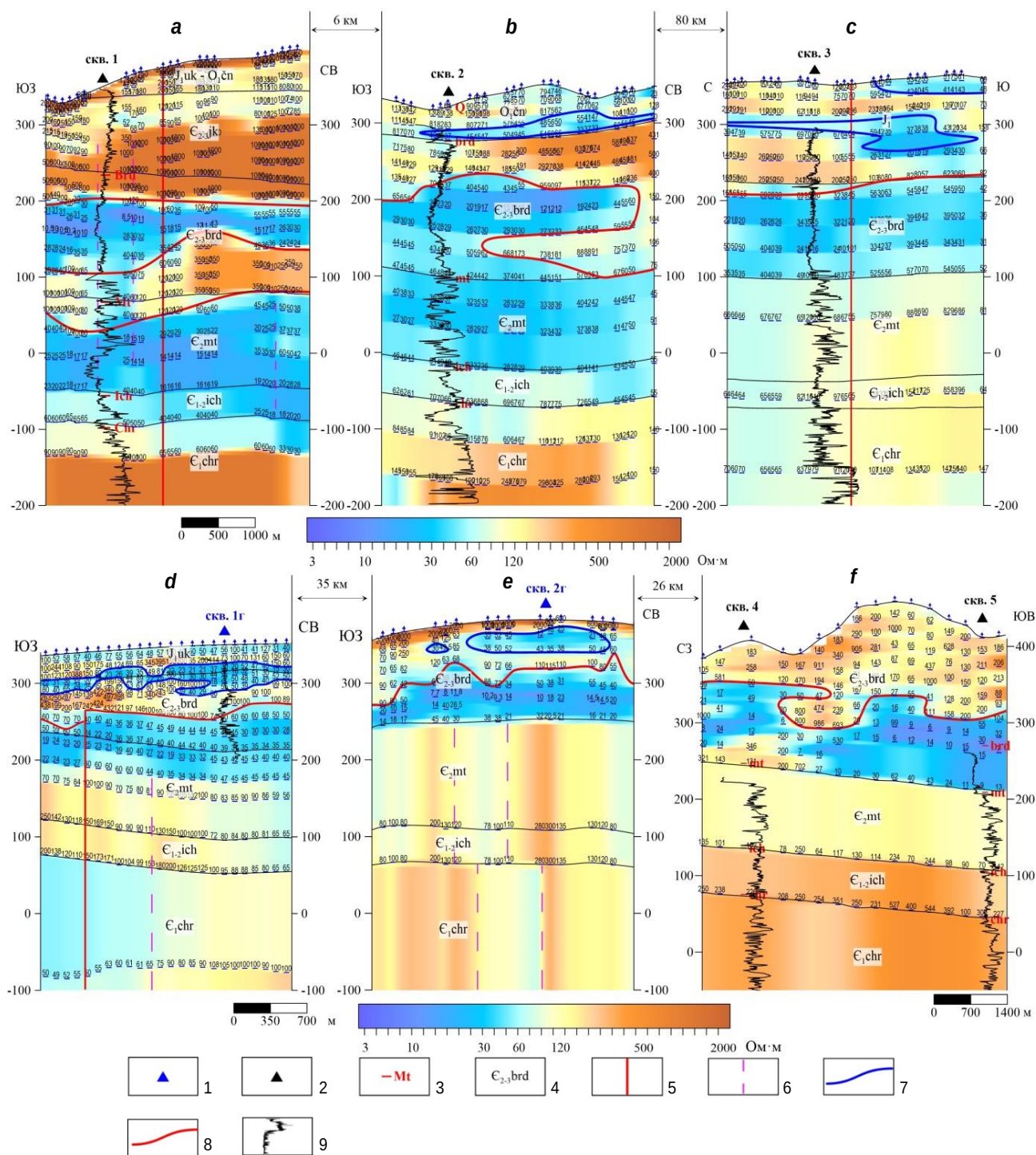


Рис. 9. Фрагменты типовых геоэлектрических разрезов, отображающих криогидрогеологические условия верхней части разреза:

a – северная оконечность Мирнинского структурного мыса; *b* – Мирнинская брахиантиклиналь;

c – Иктехское куполовидное поднятие; *d* – северная часть Среднеботубинской антиклинали;

e – центральная часть Среднеботубинской антиклинали; *f* – область сочленения

Непского свода и Мирнинского структурного мыса:

1 – гидрогеологические скважины; 2 – скважины глубокого бурения; 3 – стратиграфические отбивки в скважинах; 4 – индексы стратиграфических подразделений; 5 – тектонические нарушения, известные по данным сейсморазведки; 6 – тектонические нарушения, предполагаемые по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 7 – границы горизонтов с пониженными значениями сопротивления по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 8 – границы слоев с повышенными значениями сопротивления, связанных с многолетнемерзлыми породами по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 9 – диаграммы бокового каротажа



Fig. 9. Fragments of typical geoelectric sections showing the cryohydrogeological conditions of the upper part of the section:

a – northern extremity of the Mirny structural cape; b – Mirny brachianticline; c – Iktekh dome-shaped uplift; d – northern part of the Middle Botuoba anticline; e – central part of the Middle Botuoba anticline; f – the junction area of the Nepa arch and the Mirny structural cape:

1 – hydrogeological wells; 2 – deep-hole wells; 3 – stratigraphic toppings in wells; 4 – indices of stratigraphic units; 5 – tectonic faults known from seismic survey data; 6 – tectonic faults, assumed according to the shallow near-field TEM soundings data; 7 – boundaries of the horizons with reduced resistivity values according to the shallow near-field TEM soundings data; 8 – boundaries of layers with increased resistance values associated with permafrost rocks according to the shallow near-field TEM sounding data; 9 – lateral logging diagrams

Минимумы глубины залегания многолетнемерзлых пород фиксируются на территории Среднеботуобинского месторождения. По данным термометрии, температура пород в зоне многолетней мерзлоты здесь изменяется от 0 до $-2,3^{\circ}\text{C}$ и преимущественно держится на близких к 0 величинах (вероятно, по причине недостаточной выстойки скважин). Глубина их залегания варьирует от 0 до 90 м, в единичных скважинах достигая 160 и 175 м.

По данным анализа геоэлектрического строения, а также температурных исследований, в гидрогеологических скважинах отмечается аномалия в строении мерзлоты и криолитозоны в целом в центральной части Среднеботуобинского локального поднятия, где мощность многолетнемерзлых пород сокращается до 40–90 м и полного отсутствия на фоне 100–150 м, свойственным рассматриваемому району.

В связи с данной аномалией в центральных частях структуры развиты таликовые зоны, вмещающие пресные воды, удельные дебиты притоков составляют 2,5–5,9 л/с, способны обеспечивать техническое водоснабжение и систему поддержания пластового давления. Пример выделения таликовой зоны в геоэлектрическом разрезе приведен на рис. 10. Наличие таликовых вод на территории месторождения было установлено в 2015 г., их распространение в плане было околонушено по результатам бурения с учетом данных мЗСБ в период 2016–2017 гг. С 2017 г. начата промышленная эксплуатация Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод.

Согласно техническим отчетам по строительству водозаборных скважин ООО «Ангарская геологическая экспедиция», талики имеют радиационную природу. По данным источника [21], они формируются на водораздельных пространствах с абсолютными отметками

дневной поверхности более +375 м. Еще одним критерием для выявления зон отсутствия мерзлых пород является присутствие обильной растительности на дневной поверхности [21, 25]. Водовмещающими породами служат песчаники укугутской свиты нижней юры и верхних горизонтов верхоленского комплекса среднего – верхнего кембрия. Глубина залегания водоносных объектов составляет не более 100 м от поверхности. Воды – пресные гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатно-сульфатные магниевые с минерализацией 0,25–0,8 г/л, жесткостью 2,75–10,5 мг-экв/л.

Результаты исследования и их обсуждение

В целом локальные линзы талых пород отмечаются, согласно данным мЗСБ, на всех рассматриваемых территориях (см. рис. 9), однако их водообильность не изучена скважинами. Вероятно, ввиду их малых площадей распространения и зачастую отсутствия связи с нижележащими водоносными комплексами она существенно уступает таликам Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод. Результаты электроразведочных работ методом мЗСБ, проведенных на территории Якутии в период 2016–2022 гг., свидетельствуют об уникальности данной области в криогидрогеологическом плане. На сегодняшний день на территориях, рассматриваемых в данной статье, не вскрыты таликовые зоны, сопоставимые по запасам со Среднеботуобинским месторождением технических подземных вод. На данный момент нет единой теории происхождения столь обширных и водообильных талых зон. Среди факторов, которые могли оказать тепляющее воздействие на мерзлую зону, рассматриваются радиационный, тектонический, техногенный.

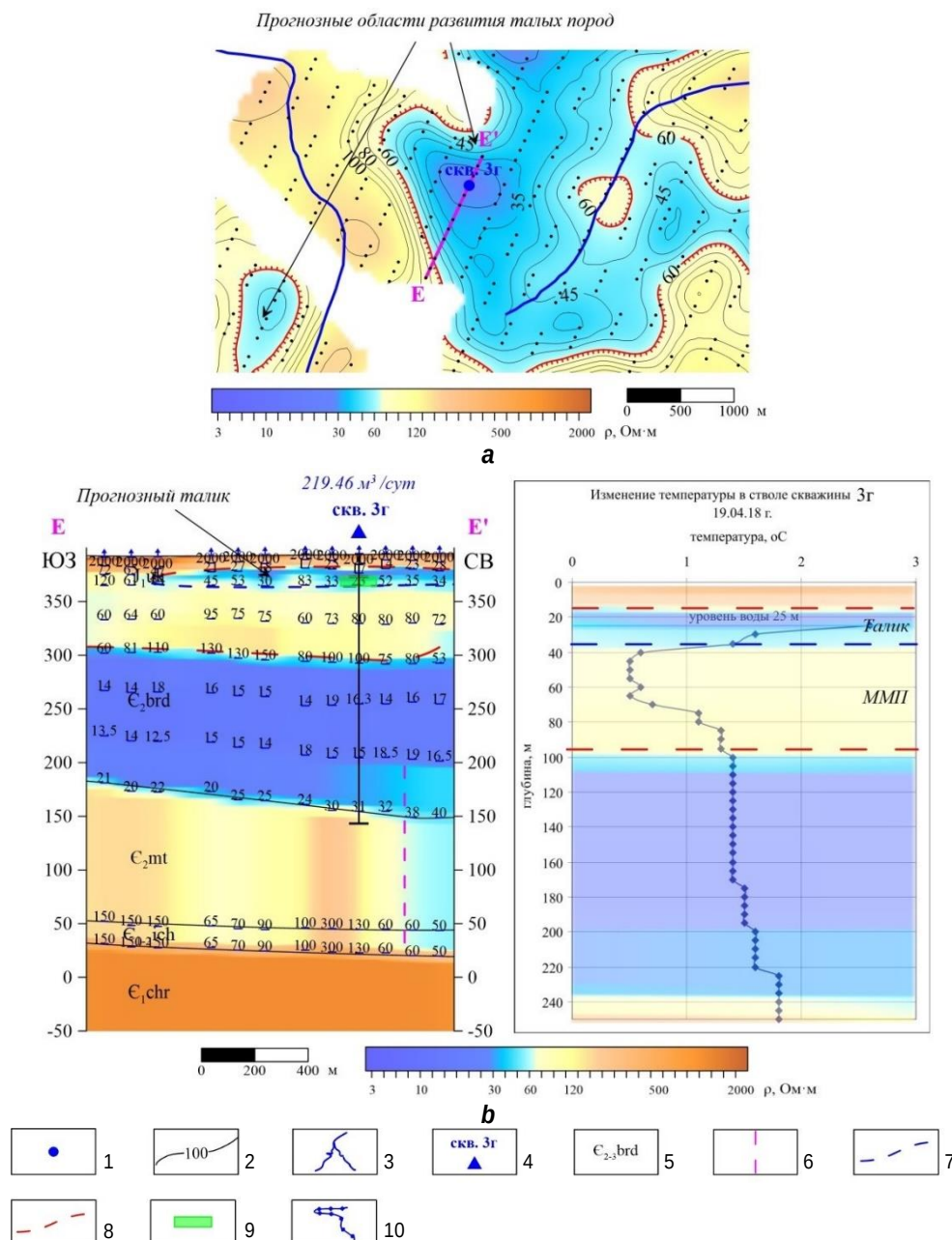


Рис. 10. Пример выделения таликовой зоны на территории Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод:

а – карта удельного электрического сопротивления интервала распространения многолетнемерзлых пород (нижнеюрско-верхнекембрийские отложения); **б** – геоэлектрический разрез в сопоставлении с термограммой:

1 – гидрогеологическая скважина на карте; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 3 – гидросеть;

4 – гидрогеологическая скважина на разрезе; 5 – индексы стратиграфических подразделений; 6 – тектонические нарушения, предполагаемые по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне;

7 – границы межмерзлотных горизонтов по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 8 – границы ярусов многолетнемерзлых пород по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 9 – интервал водопритока; 10 – термограмма (после выстойки в течение трех суток)

Fig. 10. An example of talik zone identification on the territory of the Middle Botuoba field of technical underground waters:

а – electrical resistivity map of permafrost distribution interval (Lower Jurassic-Upper Cambrian deposits); **б** – goelectric section as compared with the temperature log:

1 – hydrogeological well on the map; 2 – isolines of longitudinal resistivity, Ohm·m; 3 – hydraulic network;

4 – hydrogeological well in the section; 5 – indices of stratigraphic units; 6 – tectonic faults, assumed according to the shallow near-field TEM sounding data; 7 – boundaries of interpermafrost horizons according to the shallow near-field TEM sounding data; 8 – boundaries of permafrost stages according to the shallow near-field TEM sounding data; 9 – water inflow interval; 10 – temperature log (after 3 days curing)



Заключение

Проведенные исследования позволили решить ряд геологических и гидрогеологических задач:

1. Дифференцировать породы на мерзлые и талые – получить новые данные о морфологии толщ многолетнемерзлых пород, выявить межмерзлотные талики, перспективные на вскрытие коллекторов пресных и слабоминерализованных вод.

2. Уточнить особенности тектонического строения верхней части разреза территорий и их влияние на размещение коллекторов подземных вод.

3. Минимизировать риски бурения гидрогеологических скважин с неудовлетворительным результатом.

4. Прогнозировать участки осложнений при бурении скважин, связанных с мерзлотой (таких как разрушения стенок скважины, прихваты бурового инструмента, газопроявления, связанные с коллекторами, в виде поглоще-

ний бурового раствора, ускорения механической проходки).

В результате отмечена неравномерная геотермическая изученность района. Прослежено сокращение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород с северо-востока на юго-запад от 400 до 150 м. На территории Среднеботуобинского месторождения закартировано прерывистое распространение мерзлых толщ, выявлены таликовые зоны с разной водообильностью, ряд выявленных объектов водоснабжения эксплуатируется.

Таким образом, на сегодняшний день для территорий Республики Саха (Якутии) остается актуальной организация источников водоснабжения в подмерзлотных водоносных комплексах. Для поисков представительных межмерзлотных источников подземных вод требуется дальнейшее изучение криогидрогеологических систем бурением в комплексе с электроразведочными работами методом МЗСБ.

Список источников

1. Шепелёв В.В., Павлова Н.А., Иванова Л.Д. Состояние и перспективы использования подземных вод в Якутии // Наука и техника в Якутии. 2016. № 1. С. 22–26. <https://elibrary.ru/yxlgwl>.

2. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции / науч. ред. Е.В. Складов. Новосибирск: Гео, 2009. 319 с. <https://elibrary.ru/qkiutb>.

3. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии / отв. ред. Е.В. Складов. Новосибирск: Гео, 2019. 214 с.

4. Kotlyakov V., Khromova T. Land resources of Russia – maps of permafrost and ground ice, version 1 // National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center [Электронный ресурс]. URL: <https://nsidc.org/data/ggd600/versions/1> (16.09.2022).

5. Вожов В.И., Сурнин А.И. Криолитосфера и геотермия Сибирской платформы в связи с ее нефтегазоносностью. М.: Изд-во ВИЭМС, 1983. 35 с.

6. Алексеев В.Р. Притяжение мерзлой земли / отв. ред. В.В. Шепелёв. Новосибирск: Гео, 2016. 535 с.

7. Ефимов А.И. Температура многолетнемерзлых горных пород в окрестностях г. Мирный // Современные вопросы региональной и инженерной геокриологии (мерзлотоведения): сб. ст. М.: Наука, 1964. С. 63–83.

8. Белопахова Е.Б. Льдистость и температура многолетнемерзлых пород лога Хабардина // Труды Института мерзлотоведения АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. XVII. С. 58–62.

9. Мощанский В.А., Мулина А.В. Некоторые данные о строении верхней части многолетнемерзлой толщи в пределах Лено-Вилуйского водораздела // Мерзлот-

ные исследования: сб. ст. М.: Изд-во МГУ, 1961. Вып. II. С. 115–128.

10. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.

11. Девяткин В.Н. Тепловой поток криолитозоны Сибири (методика и результаты изучения). Новосибирск: Наука, 1993. 162 с.

12. Девяткин В.Н. Результаты определения глубинного теплового потока на территории Якутии // Региональные и тематические геокриологические исследования: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1975. С. 148–150.

13. Девяткин В.Н., Гаврильев Р.И. Геотермия вмещающих пород карьера Мир (Западная Якутия) // Строение и тепловой режим мерзлых пород: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1981. С. 76–79.

14. Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии в связи с ее нефтегазоносностью // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы: сб. науч. тр. Новосибирск: Изд-во СНИИГиМС, 1982. С. 18–28.

15. Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / отв. ред. А.В. Павлов. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.

16. Климовский И.В., Готовцев С.П. О природе аномалий температуры мерзлых толщ в Западной Якутии // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии: сб. науч. тр. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1983. С. 54–65.

17. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 165 с.



18. Мельникановицкий И.М., Ряполова В.А., Хорди-
кайнен М.А. Методика геофизических исследований
при поисках и разведке месторождений пресных вод /
под ред. А.А. Огильви. М.: Недра, 1982. 239 с.

19. Буддо И.В., Поспеев А.В. Прецизионная инвер-
сия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Си-
бирской платформы: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ,
2019. 149 с. <https://elibrary.ru/myuykus>.

20. Reynolds J.M. An introduction to applied and envi-
ronmental geophysics. Chichester: John Wiley and Sons
Ltd., 1997. 796 p.

21. Валеев Р.Р., Колесников Д.В., Буддо И.В.,
Ильин А.И., Аксеновская А.А., Черкасов Н.А., Агафонов
Ю.А., Гринченко В.А. Подход к решению проблемы де-
фюита воды для системы поддержания пластового
давления нефтяных месторождений Восточной Сибири
(на примере Среднеботуобинского НГКМ) // Геология,
геофизика и разработка нефтяных и газовых месторож-
дений. 2019. № 1. С. 55–67. <https://elibrary.ru/ytnxjz>,

<https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-55-67>.

22. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная ин-
дуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.

23. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электро-
разведка таликов криолитозоны Центральной Якутии /
отв. ред. Г.М. Тригубович. Якутск, 2003. 123 с. <https://elibrary.ru/qkehjx>.

24. Балобаев В.Т., Голубев В.А., Девяткин В.Н.,
Дорофеева Р.П., Дучков А.Д., Зорин Ю.А. [и др.]. Труды
института геологии и геофизики. Вып. 681. Тепловое
поле недр Сибири / отв. ред. Э.Э. Фотиади. Новоси-
бирск: Наука, 1987. 200 с.

25. Medvedkov A., Vysotskaya A., Olchev A. Detection
of geocryological conditions in boreal landscapes of the
southern cryolithozone using thermal infrared remote sens-
ing data: a case study of the northern part of the Yenisei
Ridge // Remote Sens. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 291.
<https://doi.org/10.3390/rs15020291>.

References

1. Shepelev V.V., Pavlova N.A., Ivanova L.D. State
and application prospects of groundwater in Yakutia.
Nauka i tekhnika v Yakutii. 2016;1:22–26. (In Russ.).
<https://elibrary.ru/yxlglw>.

2. Alekseev S.V. Cryohydrogeological systems of the
Yakutsk diamondiferous province. Novosibirsk: Geo; 2009.
319 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qkiutb>.

3. Alekseeva L.P., Alekseev S.V. Geochemistry of un-
derground ice, saline waters and brines of Western Yaku-
tia. Novosibirsk: Geo; 2019. 214 p. (In Russ.).

4. Kotlyakov V., Khromova T. Land resources of Rus-
sia – maps of permafrost and ground ice, version 1. Na-
tional Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive
Center. Available from: [https://nsidc.org/data/ggd600/ver-](https://nsidc.org/data/ggd600/versions/1)
sions/1 [Accessed 16 September 2022].

5. Vozhov V.I., Surnin A.I. Cryolithosphere and geo-
thermy of the Siberian platform in terms of its oil and gas
potential. Moscow: All-Russian Research Institute of Eco-
nomics of Mineral Raw Materials and Geological Explora-
tion; 1983. 35 p. (In Russ.).

6. Alekseev V.R. Attraction of the frozen earth. Novo-
sibirsk: Geo; 2016. 535 p. (In Russ.).

7. Efimov A.I. Temperature of permafrost rocks in the
vicinity of Mirny. In: *Sovremennye voprosy regional'noi i in-
zhenernoi geokriologii (merzlotovedeniya) = Modern issues
of regional and engineering geocryology (permafrost sci-
ence)*. Moscow: Nauka; 1964, p. 63–83. (In Russ.).

8. Belopukhova E.B. Ice content and temperature of
permafrost rocks of the Khabardin ravine. In: *Trudy Instituta
merzlotovedeniya AN SSSR = Proceedings of the Institute
of Permafrost Science of the Academy of Sciences of the
USSR*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1961, vol.
17, p. 58–62. (In Russ.).

9. Moshchanskii V.A., Mulina A.V. Some data on the
structure of the upper part of the permafrost within the
Lena-Vilyui watershed. In: *Merzlotnye issledovaniya = Per-
mafrost studies*. Moscow: Lomonosov Moscow State Uni-
versity; 1961, iss. 2, p. 115–128. (In Russ.).

10. Ershov E.D. *Geocryology of the USSR. Eastern
Siberia and the Far East*. Moscow: Nedra; 1989. 515 p.
(In Russ.).

11. Devyatkin V.N. Heat flow of the Siberian perma-
frost zone (methodology and study results). Novosibirsk:
Nauka; 1993. 162 p. (In Russ.).

12. Devyatkin V.N. Determination results of deep heat
flow in Yakutia. In: *Regional'nye i tematicheskie geokriolog-
icheskie issledovaniya = Regional and thematic geocryo-
logical studies*. Novosibirsk: Nauka; 1975, p. 148–150.
(In Russ.).

13. Devyatkin V.N., Gavril'ev R.I. Geothermy of host
rocks of Mir open pit (Western Yakutia). In: *Stroenie i teplovoi
rezhim merzlykh porod = Structure and thermal regime of
frozen rocks*. Novosibirsk: Nauka; 1981, p. 76–79. (In Russ.).

14. Balobaev V.T., Devyatkin V.N. Permafrost and ge-
othermal conditions of Western Yakutia in connection with
its oil and gas potential. In: *Gidrogeologiya neftegazo-
nosnykh oblastei Sibirskoi platform = Hydrogeology of oil
and gas bearing regions of the Siberian platform*. Novosi-
birsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics
and Mineral Resources; 1982, p. 18–28. (In Russ.).

15. Pavlov A.V. Thermophysical studies of Siberian per-
mafrost zone. Novosibirsk: Nauka; 1983. 214 p. (In Russ.).

16. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. On the nature of fro-
zen strata temperature anomalies in Western Yakutia. In:
*Regional'nye geokriologicheskie issledovaniya v Vostoch-
noi Azii = Regional geocryological studies in East Asia*.
Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1983, p. 54–65.
(In Russ.).

17. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. Cryolithozone of the
Yakutsk diamondiferous province. Novosibirsk: Nauka;
1994. 165 p. (In Russ.).

18. Mel'nikanovitskii I.M., Ryapolova V.A., Khordi-
kainen M.A. Methods of geophysical research in prospect-
ing and exploration of fresh water deposits. Moscow:
Nedra; 1982. 239 p. (In Russ.).

19. Buddo I.V., Pospeev A.V. Precision inversion of the



near field transient EM sounding data in oil and gas exploration in the south of the Siberian Platform: monograph. Irkutsk: Irkutsk State University; 2019. 149 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/myykuc>.

20. Reynolds J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1997. 796 p.

21. Valeev R.R., Kolesnikov D.V., Buddo I.V., Ilyin A.I., Aksenovskaya A.A., Cherkasov N.A., Agafonov Yu.A., Grinchenko V.A. An approach to the water shortage problem solution for a reservoir pressure maintenance of oil fields in the Eastern Siberia (on the example of Srednebotuobinsky oil and gas-condensate field). *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2019;1:55-67. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ytngxjz>, <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-55-67>.

22. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Pulsed inductive electrical exploration of polarizing media. *Geofizicheskii zhurnal*. 2009;31(4):104-118. (In Russ.).

23. Stognii V.V. *Pulsed inductive electrical exploration of permafrost zone taliks in Central Yakutia*. Yakutsk; 2003. 123 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qkehjx>.

24. Balobaev V.T., Golubev V.A., Devyatkin V.N., Dorofeeva R.P., Duchkov A.D., Zorin Yu.A., et al. *Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics. Issue. 681. Thermal field of Siberian bowels*. Novosibirsk: Nauka; 1987. 200 p. (In Russ.).

25. Medvedkov A., Vysotskaya A., Olchev A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: a case study of the northern part of the Yenisei Ridge. *Remote Sens*. 2023;15(2):291. <https://doi.org/10.3390/rs15020291>.

Информация об авторах / Information about the authors



Оцимик Анастасия Александровна,

геолог 1-й категории,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,

✉ oaa@sigma-geo.ru

Anastasia A. Otsimik,

1st Category Geologist,
SIGMA-GEO LLC,
Irkutsk, Russia,

✉ oaa@sigma-geo.ru



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель генерального директора по науке,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,

заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,

г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Россия,
biv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>

Igor V. Buddo,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director General for Science,
SIGMA-GEO LLC,
Irkutsk, Russia,

Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,

Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

biv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>



Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 30.03.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 10.05.2023.



Краткое сообщение

УДК 550.380

<https://elibrary.ru/clamag><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>

Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки

Н.В. Снегирёв^a, С.В. Гаченко^b, А.В. Паршин^c^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^cИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Предметом представленного исследования являлся вопрос о степени снижения информативности геофизических данных при переходе от наземных съемок к маловысотной геофизической разведке с применением беспилотных летательных аппаратов. В ходе работы был проведен сравнительный анализ информативности результатов съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов и наземной магнитной съемки. По итогам исследования приведены наблюдаемые значения магнитного поля, полученные обеими методиками сбора в пределах одной площади, и конечные информационные продукты – результаты фильтрации и трехмерной инверсии данных. Показано, что при визуальном анализе карт полного вектора напряженности магнитного поля возникает впечатление о более низкой информативности магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов, однако после обработки данных итоговые информационные продукты характеризуются идентичной информативностью. Это касается как результатов трехмерного моделирования эффективной магнитной восприимчивости, так и карт и графиков аномального магнитного поля после фильтрации в скользящем окне. Также показано негативное влияние геологической помехи от моренных отложений на наземные данные. Локальные магнитные аномалии по результатам съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов могут уверенно коррелировать с аномалиями наземной съемки, причем собираемые в ходе проведения маловысотной аэромагниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов данные имеют меньшую вероятность получения ошибки. Выводы относятся к конкретному случаю и не могут быть однозначно транслированы на любые геологические ситуации, однако авторы считают, что данный пример достаточно типичен.

Ключевые слова: магниторазведка, беспилотная аэрогеофизика, магнитная восприимчивость, трехмерное моделирование геологической среды

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-67-47037.

Для цитирования: Снегирёв Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 182–189. <https://elibrary.ru/clamag>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>.

Brief report

Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey

Nikita V. Snegirev^a, Sergey V. Gachenko^b, Alexander V. Parshin^c^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^cA.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The subject of the study is the problem of the decline degree of the information content of geophysical data when switching from land surveys to low-altitude geophysical survey using unmanned aerial vehicles. The research involves a comparative analysis of the information content of the unmanned aerial vehicle survey results and those of the



land magnetic survey. The conducted research allowed to present the observed values of the magnetic field obtained by both survey methods within the same area as well as the final information products in the form of the results of filtering and three-dimensional data inversion. It is shown that visual analysis of maps of the full vector of magnetic field strength gives the impression of a lower information content of magnetic survey performed by unmanned aerial vehicles. However, the data having been processed create final information products of identical information content. This concerns both the results of three-dimensional modeling of the effective magnetic susceptibility, and maps and plots of the anomalous magnetic field after filtering in a sliding window. The negative impact of geological interference from morainic deposits on ground data is also shown. Local magnetic anomalies based on unmanned aerial vehicle survey results can confidently correlate with land survey anomalies, whereas the data collected during low-altitude aeromagnetic survey using unmanned aerial vehicles have a lower error probability. The conclusions refer to a specific case and cannot be unambiguously applied to any geological situation, however, the authors believe in the typicality of this example.

Keywords: magnetic survey, unmanned airborne geophysics, magnetic susceptibility, three-dimensional modeling of geological environment

Funding: The work was funded by the Russian Science Foundation grant no. 20-67-47037.

For citation: Snegirev N.V., Gachenko S.V., Parshin A.V. Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):182-189. (In Russ.). <https://elibrary.ru/clamag>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>.

Введение

На сегодняшний день наиболее современным способом выполнения магниторазведки является сбор данных с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В качестве ключевого преимущества беспилотных съемок можно обозначить оперативный сбор данных даже в условиях сложного ландшафта. В то же время, поскольку аномалии магнитного поля с высотой затухают, возникает вопрос о возможной потере информации и пропуске относительно небольших, но значимых геологических объектов. Здесь необходимо отметить, что делать выводы о полноте информации на основе сопоставления первичных результатов магнитной съемки – карт модуля полного вектора напряженности магнитного поля, по нашему мнению, бессмысленно, так как такие карты характеризуют совокупный сигнал от всей геологической среды на глубины до десятков километров, а при решении большинства реальных задач геологической разведки интерес представляет только ее верхняя часть. Для получения информации, характеризующей приповерхностную часть разреза, применяют локальные трансформации и решение обратных задач, что позволяет на качественном или количественном уровне выделить небольшие аномалеобразующие структуры. В связи с этим в данной работе мы сравниваем именно результаты фильтрации и инверсии данных наземной и БПЛА магнитных съемок, а не полное поле. Безусловно, один пример не может претендовать на универсальность вы-

водов, но, на наш взгляд, представленный материал является очередным наглядным примером в пользу доказательства принципиальной возможности отказа от наземных съемок во многих геологических ситуациях.

Материалы и методы исследования

На участке недр в одном из горных районов Восточной Сибири выполнена БПЛА- и наземная магниторазведка. И наземная, и БПЛА-съемка выполнялись с шагом между профилями в 20 м, однако направление профилей несколько отличалось. Пешеходная съемка выполнялась в движении с постоянной записью значений раз в три секунды по заранее подготовленным профилям. БПЛА-съемка выполнялась при помощи комплекса SibGIS UAS [1] (рис. 1) на высоте 44 м под датчиком магнитометра с частотой измерений 2 Гц при скорости полета 8 м/с. Предел систематической погрешности магнитометрического канала БПЛА-системы – 0,5 нТл, чувствительность – 0,015 нТл.

Съемка выполнялась с детальным обтеканием рельефа с погрешностью удержания высоты 10 % от плановой. В обоих случаях применялись высокоточные протонные магнитометры.

Результаты исследования и их обсуждение

Карты первичных данных приведены на рис. 2.



Рис. 1. Беспилотная аэрогеофизическая система SibGIS UAS в варианте для магнитной съемки
Fig. 1. Unmanned airborne geophysical system SibGIS UAS in the magnetic survey version

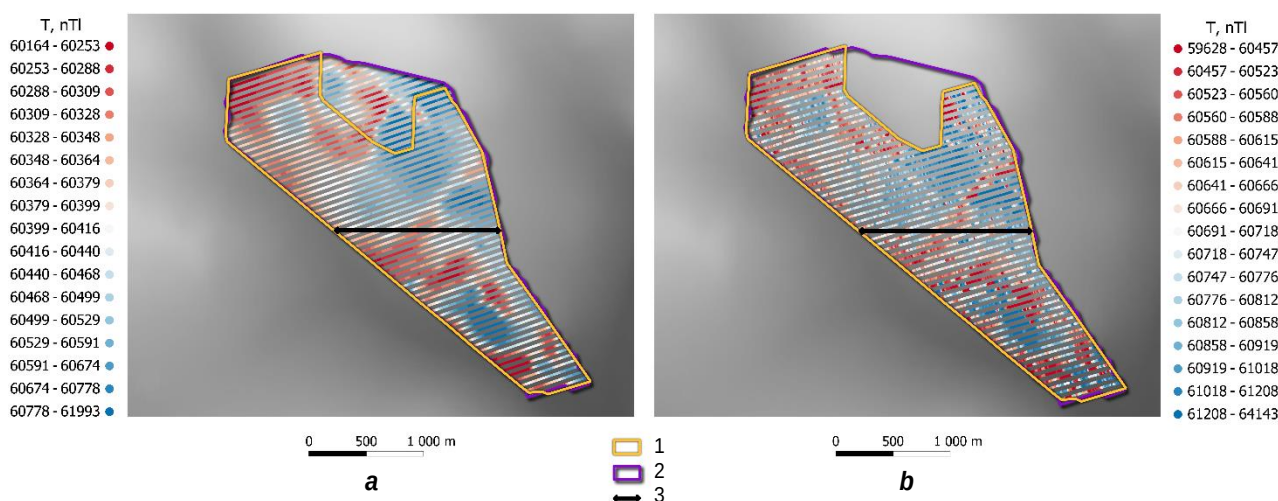


Рис. 2. Схемы наблюдаемых значений магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов (а) и наземной магниторазведки (б) с указанием линии профиля 1:

1 – наземная съемка; 2 – съемка с помощью беспилотного летательного аппарата; 3 – линия профиля

Fig. 2. Diagrams of observed values of magnetic survey using unmanned aerial vehicles (UAV) (a) and land magnetic survey (b) indicating the profile 1 line:

1 – land survey; 2 – UAV-based survey; 3 – profile line

По данным съемки с БПЛА, интенсивные локальные аномалии заметно затухают, что объясняется удалением магнитометра от намагниченного геологического тела при производстве измерений на высоте полета (см. рис. 2, а). При выходах тел на поверхность разность удаленности для наземного измерительного прибора и БПЛА может достигать сотен раз. Принимая затухание магнитного поля

при удалении от его источника пропорционально квадрату расстояния, будем иметь кратное уменьшение фиксируемых локальных магнитных аномалий. Таким образом, при рассмотрении первичных данных наземной и БПЛА-съемки создается впечатление, что первая является более предпочтительной с позиции информативности. Тем не менее следует отметить высокую дисперсию данных



наземной съемки, вызванную моренными отложениями, не имеющими однородной намагниченности. Этот фактор можно считать геологической помехой.

Выделим локальную компоненту из данных магнитной БПЛА-съемки. Для решения задачи воспользуемся осреднением поля в скользящем окне радиусом 70 м, а затем вычтем наблюдаемое поле из осредненного. В данных наземной съемки интенсивность локальных аномалий значительно превосходит интенсивность регионального фона, поэтому оставляем данные наземной съемки без изменений. Сопоставление графиков наземной съемки с графиками локальных аномалий, фиксированными БПЛА-измерениями, показано на рис. 3, *b*.

Сравнение графиков наземной и БПЛА-съемки осложнено различным плановым расположением сети наземных профилей и маршрутов БПЛА, различиями в шаге наблюдений, в связи с этим сравнение производится путем переинтерполяции данных на общий

профиль. В итоге неизбежно возникают ошибки интерполяции, приводящие к искажению исходных кривых. Небольшие имеющиеся погрешности в равной мере будут относиться как к той, так и к другой съемке. Однако в целом можно достаточно уверенно констатировать, что все основные экстремумы аномалий, даже незначительные, заметны при обоих способах съемки, в связи с чем информативность получаемых данных является примерно аналогичной. Оказывается, что в БПЛА-данных, полученных на высоте в несколько десятков метров, содержится вся основная информация, пусть и на уровне аномалий в первые нанотесла, которые тем не менее вполне удастся выделить в результате фильтрации. Таким образом, карты аномального поля, являющиеся одним из основных информационных материалов для геологической интерпретации, по факту имеют одинаковое информационно-картографическое содержание, фиксируют одни и те же геологические объекты.

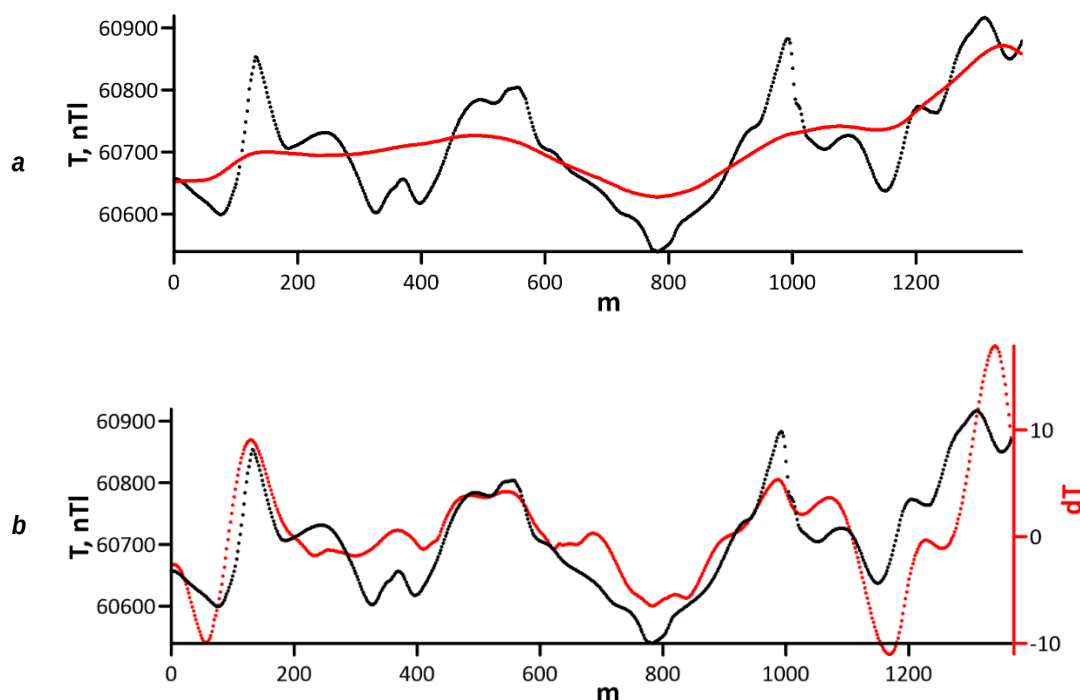


Рис. 3. Графики для профиля 1:

a – полный вектор для наземной магнитной съемки (черного цвета) и съемки с применением беспилотных летательных аппаратов (красного цвета); *b* – полный вектор для наземной магнитной съемки (черного цвета) и локальная составляющая по данным съемки с применением беспилотных летательных аппаратов (красного цвета)

Fig. 3. Graphs for profile 1:

a – full vector for land magnetic survey (black) and unmanned aerial vehicle (UAV) survey (red);
b – full vector for the land magnetic survey (black) and the local component according to the UAV-based survey data (red)

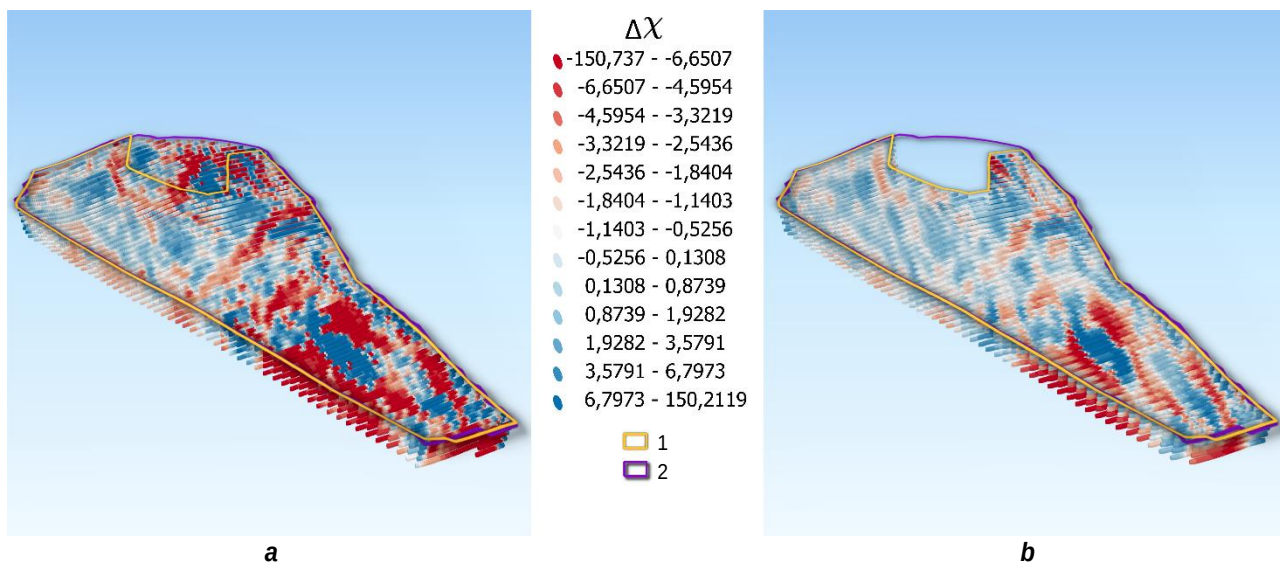


Рис. 4. Трехмерные модели кажущейся магнитной восприимчивости по данным магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов (а) и пешеходной магниторазведки (б):

1 – наземная съемка; 2 – съемка с помощью беспилотного летательного аппарата

Fig. 4. 3D models of apparent magnetic susceptibility according to the magnetic survey data using unmanned aerial vehicles (UAV) (a) and walking magnetic survey (b):

1 – land survey; 2 – UAV-based survey

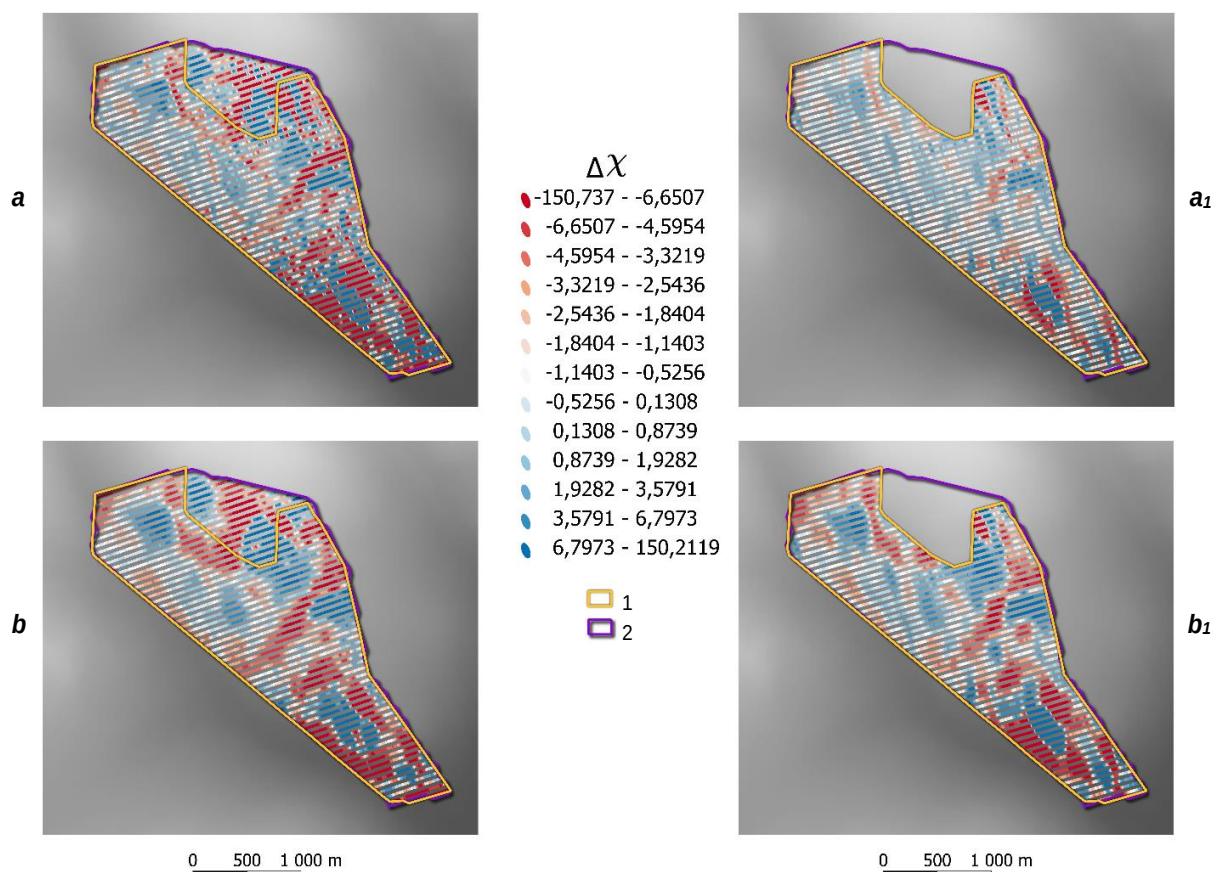


Рис. 5. Срезы кажущейся магнитной восприимчивости согласно съемке с применением беспилотных летательных аппаратов (слева) и наземной съемке (справа):

a, a₁ – 0–25 м; b, b₁ – 25–50 м:

1 – наземная съемка; 2 – съемка с помощью беспилотного летательного аппарата

Fig. 5. Sections of apparent magnetic susceptibility according to the unmanned aerial vehicle (UAV) survey (left) and land survey (right):

a, a₁ – 0–25 м; b, b₁ – 25–50 м:

1 – land survey; 2 – UAV-based survey



Сравнению первичных данных наземных и БПЛА-съемок и их трансформант посвящено некоторое количество публикаций [2–4 и др.]. В существенно меньшем количестве работ [5] изучаются возможности наземной и БПЛА-магнитной съемки при интерпретации их данных с помощью 3D-инверсии, хотя такой подход, позволяющий перейти от параметров поля к кажущимся параметрам геологической среды, является современным и востребованным. По полученным данным методом Ос-сам [6] были построены две трехмерные модели магнитной восприимчивости горных пород (рис. 4).

На рис. 5 приведены срезы эффективной магнитной восприимчивости для горизонтов 0–25 и 25–50 м.

Из рис. 4 и 5 заметно, что наибольшие отличия наблюдаются в самом верхнем слое полученной 3D-модели (где в данных наземной съемки максимально проявлена геологическая помеха, которая на высоте более 40 м уже не ощущается). Следующий срез на глубине 25–50 м практически тождественен. Все основные объекты геометризованы по данным обоих методов, таким образом, можно

констатировать, что при одинаково высоком качестве съемки результаты инверсии, за исключением самого приповерхностного слоя, на практике оказались одинаково информативными.

Заключение

Приведенный пример показывает, что на практике полнота информации, которую можно получить из данных БПЛА- и наземной съемки, может быть аналогичной. Это справедливо как в случае обработки данных БПЛА-съемки методами фильтрации, так и при применении методов 3D-инверсии. Максимальные отличия возможны в самой верхней части разреза, поскольку удаленность прибора на несколько десятков метров от поверхности земли сводит на нет помехи, вызванные хаотично ориентированными обломками магнитных горных пород, глыбами, скрытыми в почвенном слое. В ряде случаев это может быть достоинством. Безусловно, данный пример не является всеобъемлющим, но представляется, что в реальной геологопоисковой практике результат в большинстве случаев будет примерно таким же.

Список источников

1. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. <https://elibrary.ru/xqrzbr>, [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)).

2. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-Spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

3. Schmidt V., Becken M., Schmalz J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site // First Break. 2020. Vol. 38. Iss. 8. P. 61–66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020061>.

4. Cunningham M., Samson C., Laliberté J., Goldie M., Wood A., Birkett D. Comparison between ground, helicopter, and unmanned aircraft system magnetic datasets: a case study from the Abitibi Greenstone Belt, Canada // Pure and Applied Geophysics. 2022. Vol. 179. P. 1871–1886. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03025-9>.

5. Tereshkin S., Davydenko S., Davydenko Y., Davydenko A., Parshin A., Snopkov S. UAVs and ground-based geophysical surveys and 3D inversion when studying archeological objects in Baykal Region // Near Surface Geoscience Conference & Exhibition 2021: 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2021. Vol. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120256>.

6. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // Geophysics. 1987. Vol. 52. Iss. 3. P. 289–300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.

References

1. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structuralgeological mapping and prospecting for ore

deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xqrzbr>, [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)).



2. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

3. Schmidt V., Becken M., Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site. *First Break*. 2020;38(8):61-66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020061>.

4. Cunningham M., Samson C., Laliberté J., Goldie M., Wood A., Birkett D. Comparison between ground, helicopter, and unmanned aircraft system magnetic datasets: a case study from the Abitibi Greenstone Belt, Canada. *Pure*

and Applied Geophysics. 2022;179:1871-1886. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03025-9>.

5. Tereshkin S., Davydenko S., Davydenko Y., Davydenko A., Parshin A., Snopkov S. UAVs and ground-based geophysical surveys and 3D inversion when studying archeological objects in Baykal Region. *Near Surface Geoscience Conference & Exhibition 2021: 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2021;2021:1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120256>.

6. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*. 1987;52(3):289-300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.

Информация об авторах / Information about the authors



Снегирёв Никита Владимирович,

младший научный сотрудник департамента геоинформатики, институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, nsnegirev@geo.istu.edu

Nikita V. Snegirev,

Junior Researcher of the Geoinformatics Department, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, nsnegirev@geo.istu.edu



Гаченко Сергей Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук, руководитель департамента геоинформатики, институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, gsvgeo@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1594-9441>

Sergey V. Gachenko,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Head of the Geoinformatics Department, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, gsvgeo@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1594-9441>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, научный сотрудник Лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия, sarhin@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>



Alexander V. Parshin,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Director of the Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Methods of Prospecting,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.05.2023; одобрена после рецензирования 05.06.2023; принята к публикации 21.06.2023.

The article was submitted 18.05.2023; approved after reviewing 05.06.2023; accepted for publication 21.06.2023.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 556.332.629

<https://elibrary.ru/wuxdvvg><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-190-200>Особенности формирования Свирского месторождения
пресных подземных водА.И. Кураничева^а, Ю.К. Ланкин^б, О.О. Наумова^с, Е.С. Верхозина^д^аИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^{б-д}Территориальный центр государственного мониторинга состояния недр по Иркутской области
Сибирского регионального центра государственного мониторинга состояния недр –
филиала ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Иркутск, Россия

Резюме. Объектом представленного исследования стало Свирское месторождение пресных подземных вод, которое находится в центральной части Иркутского артезианского бассейна второго порядка, входящего в состав Ангаро-Ленского артезианского бассейна первого порядка (Иркутская область, Россия). В геологическом отношении исследуемая территория располагается в пределах Предаянского прогиба, осложненного Иркутским выступом фундамента. Исследуемая территория, коей является так называемая Свирская гидравлическая депрессия, приурочена к тектонической зоне дробления нижнекембрийских карбонатных пород, протягивающейся полосой от устья пади Котихи до устья пади Каменки между коренным склоном и рекой Ангарой (Братским водохранилищем с 1967 г.). Цель настоящего исследования заключалась в изучении особенностей формирования, источников питания и гидрогеохимических условий данного месторождения на основании анализа результатов гидрогеологических работ, осуществленных за период с 1968 по 2012 г. Методология исследования заключалась в поиске участка с высокими коллекторскими свойствами и качеством подземных вод, отвечающим питьевым требованиям, который находится в области влияния границ постоянного напора (привлекаемые ресурсы реки Ангары), с использованием комплексного геоморфологического анализа. Описываемое месторождение характеризуется мощностью водоносного горизонта от 13 до 38,7 м, сложено закарстованными карбонатными отложениями. Коэффициент водопроницаемости составил 1284–2500 м²/сут., дебиты скважин изменялись от 4,88 л/с (422 м³/сут.) до 18,2 л/с (1572 м³/сут.) при понижениях соответственно 0,78–1 м. Качественный состав подземных вод удовлетворяет стандартам, за пределами месторождения качественные показатели ухудшаются. В ходе работы авторами были изучены неотектонические условия формирования месторождения питьевых подземных вод, обладающих качеством, удовлетворяющим требованиям централизованного водоснабжения, основным источником питания которого являются привлекаемые ресурсы Братского водохранилища.

Ключевые слова: месторождение пресных подземных вод, гидравлическая депрессия, централизованное водоснабжение, привлекаемые ресурсы

Для цитирования: Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верхозина Е.С. Особенности формирования Свирского месторождения пресных подземных вод // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 190–200. <https://elibrary.ru/wuxdvvg>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-190-200>.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Original article

Formation features of the Svirsk fresh groundwater deposit

Anna I. Kuranicheva^а, Yuriy K. Lankin^б, Olga O. Naumova^с, Elizaveta S. Verkhosina^д^аInstitute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia^{б-д}Territorial Center for State Monitoring of the Subsoil State in the Irkutsk Region
of the Siberian Regional Center for State Monitoring of the Subsoil State
(branch of the Federal State Budget Institution "Gidrospetsgeologiya"), Irkutsk, Russia

© Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верхозина Е.С., 2023



Abstract. The object of the study is the Svirsk deposit of fresh groundwater located in the central part of the Irkutsk artesian basin of the second order, which is a part of the Angara-Lena artesian basin of the first order (Irkutsk region, Russia). Geologically, the area under investigation is located within the Pre-Sayan depression, which is complicated by the Irkutsk basement bench. The studied Svirsk hydraulic depression is confined to the tectonic crush zone of the Lower Cambrian carbonate rocks stripping from the mouth of the Kotikha river valley to the mouth of the Kamenka river valley between the bedrock slope and the Angara river (Bratsk reservoir since 1967). The purpose of this study is to study the formation features, supply sources and hydrogeochemical conditions of the deposit based on the analysis of hydrogeological work carried out over the period from 1968 to 2012. The research methodology includes the search for a site with high reservoir properties and high quality of groundwater meeting drinking requirements, which is located in the influence area of constant head boundaries (attracted resources of the Angara river) using a comprehensive geomorphological analysis. The described deposit is characterized by the aquifer thickness from 13 to 38.7 m, composed of karst carbonate deposits. The water conductivity coefficient is 1284–2500 m²/day, well flow rates vary from 4.88 l/s (422 m³/day) to 18.2 l/s (1572 m³/day) with a decrease of 0.78–1 m respectively. The qualitative composition of groundwater meets the standards, whereas outside the field, quality indicators deteriorate. The authors have studied the neotectonic formation conditions of the deposit of underground drinking water, whose quality meets the requirements of the centralized water supply, the main source of which is the attracted resources of the Bratsk reservoir.

Keywords: fresh groundwater deposit, hydraulic depression, centralized water supply, attracted resources

For citation: Kuranicheva A.I., Lankin Yu.K., Naumova O.O., Verkhovina E.S. Formation features of the Svirsk fresh groundwater deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):190-200. (In Russ.). <https://elibrary.ru/wuxdvg>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-190-200>.

Введение

Водоснабжение населения г. Черемхово и Свирск до недавнего времени осуществлялось за счет поверхностных вод (р. Ангара) из поверхностного водозабора, расположенного вблизи г. Свирска. Вода в г. Черемхово подается через очистные сооружения по трем водоводам длиной по 7,5 км. В поверхностных водах акватории р. Ангара, по данным Гидрометцентра, за последние десять лет наблюдается увеличение взвешенных частиц, трудноокисляемых органических соединений и концентрации ртути [1–3]. Содержание фенолов, нефтепродуктов, ртути и пестицидов превышает предельно допустимые концентрации [4, 5]. Непосредственно в питьевой воде из водозаборных кранов отмечается значительная концентрация хлор-фенольных соединений, диоксидов и пестицидов¹. Вопрос перевода водоснабжения этих городов на защищенные от загрязнения подземные воды ставился неоднократно [6, 7].

Юрский и кембрийский водоносные комплексы подземных вод, эксплуатируемые одиночными водозаборными скважинами, имеют низкий модуль прогнозных эксплуатационных ресурсов. К тому же юрские отложения на значительных площадях дренированы в резуль-

тате шахтного водоотлива, а кембрийские содержат пресные воды лишь в самой верхней части разреза. В настоящее время единственным возможным источником улучшения качества питьевой воды является инфильтрационный водозабор Свирского месторождения пресных подземных вод.

Материалы и методы исследования

Исследуемая территория расположена на юге Сибирской платформы в пределах Предсаянского прогиба, осложненного Иркутским выступом фундамента [1, 8, 9]. Иркутский выступ фундамента характеризуется тем, что значительная часть осадочной толщи платформы здесь размыта в домезозойское время и на дневную поверхность выходят карбонатные породы нижнего кембрия. В мезозое вдоль Саянского хребта сформировался Предсаянский прогиб, заполненный юрскими осадками. На юге прогиба образовалась юрская мезозойская впадина, в пределах которой находится площадь исследований. В кайнозое по ослабленным тектоническим зонам заложена современная система долин рек, где в настоящее время широко развиты четвертичные рыхлые аллювиальные образования.

¹ Программа гидрогеологических работ для водоснабжения населенных пунктов Иркутской области (отчет по работам Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды ФГУГП «Иркутск-геология» в 2004 г.) / отв. исп. Г.А. Сидякова // Иркутский территориальный центр государственного мониторинга геологической среды. Иркутск, 2005.



Гидрогеологические особенности территории обусловлены также неотектоническими условиями, связанными с ее расположением на приподнятом крыле палеовпадины Иркутского угленосного бассейна (рис. 1). Таким образом, геологический разрез района в пределах глубины изучения представлен породами четвертичной, юрской и кембрийской систем (рис. 2, 3) [10].

Возможность добычи подземных вод в районе г. Свирска из карстового коллектора выявлена по данным исследований по строительству Бархатовской гидроэлектростанции²⁻⁴. В процессе этих работ впервые охарактеризована и в дальнейшем подтверждена крупномасштабной гидрогеологической съемкой закарстованная зона нижнекембрийских отложений [11, 12], протягивающаяся вдоль Братского водохранилища. В ее пределах зафиксирована высокая водопроницаемость, а также прослеживаются обратные уклоны зеркала подземных вод от водохранилища в сторону склона (так называемая Свирская депрессия). Наличие депрессии в урвеной поверхности подтверждается режимными наблюдениями, проводимыми Иркутским территориальным центром государственного мониторинга геологической среды с 1961 г. Во время проведения гидрогеологических съемочных работ величина обратного уклона зеркала грунтовых вод составляла 0,0001–0,00065, после наполнения Братского водохранилища она увеличилась и в зависимости от сезонов года изменяется от 0,001 до 0,00025⁵.

Свирская депрессия является закарстованной зоной, протягивающейся вдоль Братского водохранилища на 20 км в меридиональном направлении [10]. Она приурочена к тектонической зоне дробления нижнекембрийских карбонатных пород и протягивается полосой от устья пади Котихи до устья пади

Каменки между коренным склоном и р. Ангрой (Братским водохранилищем с 1967 г.) (см. рис. 1). В районе г. Свирска максимальная ширина карстовой зоны (Свирской депрессии) достигает 2 км.

Водовмещающими породами Свирского месторождения являются неравномерно закарстованные и трещиноватые известняки и доломиты. Карст и интенсивная трещиноватость развиты до глубины 50–80 м [12]. Участки пород имеют исключительно высокую степень трещиноватости и закарстованности, а значит, обладают и высокой водопроницаемостью [13, 14]. Они чередуются без всякой видимой закономерности с участками слаботрещиноватых, практически монолитных пород с очень низкой водопроницаемостью [11, 15–21]. Карст часто заполнен глиной. Закарстованная зона отделяется от Братского водохранилища слабопроницаемым «барьером» [9].

Ширина «барьера» со стороны водохранилища изменяется от 50 до 600 м. На отдельных участках он отсутствует, что определяет свободное поступление воды в закарстованную зону из водохранилища. Еще одним важным фактором формирования запасов подземных вод на исследуемой территории являются высокие фильтрационные свойства карбонатного коллектора, примыкающего к акватории водохранилища, что обуславливает возможность добычи подземных вод за счет привлекаемых ресурсов. В пределах тектонической зоны дробления прослеживался поток грунтовых вод, направленный от водохранилища в сторону склона. Таким образом, запасы подземных вод обеспечиваются естественным геофильтрационным потоком, который формируется за счет перепада уровня между водами Свирской депрессии и Братского водохранилища (рис. 4).

² Соколов Н.И. Материалы по геологии и карсту района Бархатовской ГЭС // Иркутский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу» № 478. М.: Изд-во МОСГИДЭП, 1933.

³ Флоренсов Н.А. Отчет об инженерно-геологических исследованиях в районе Бархатовской ГЭС. М.: Изд-во МОСГИДЭП, 1934.

⁴ Зернова Э.П. Бархатовская ГЭС на р. Ангаре // Иркутский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу» № 1056. М.: Изд-во МОСГИДЭП, 1955.

⁵ Ланкин Ю.К. Отчет о результатах работ по объекту «Поиски подземных вод для обеспечения водоснабжения г. Свирска Иркутской области» с оценкой запасов питьевых подземных вод по Свирскому месторождению по состоянию на 01.07.2012 г. Иркутск, 2012.

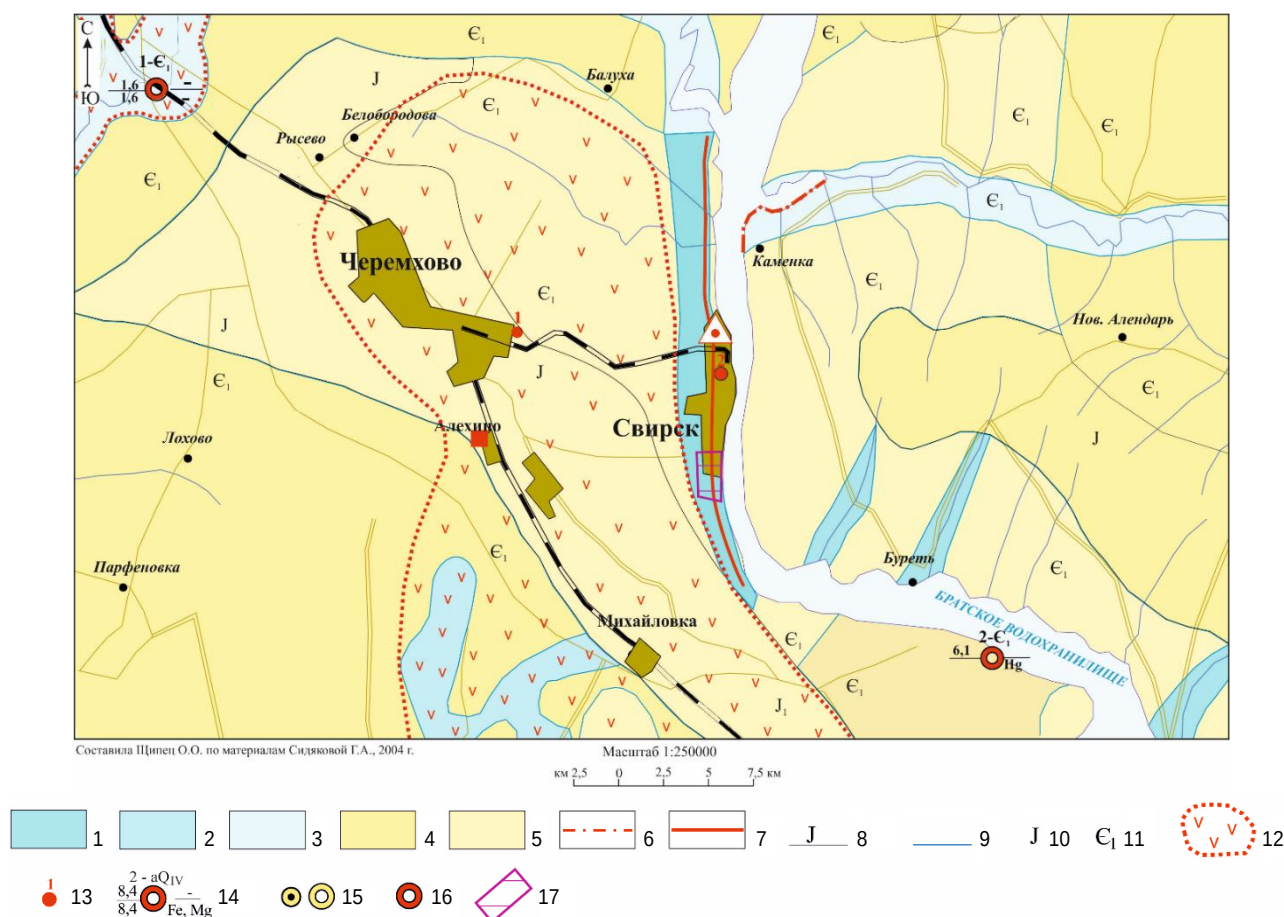


Fig. 1. Карта прогнозных эксплуатационных ресурсов г. Свирск⁶:

1–7 – линейные модули: 1 – 2–5 л/с·км², 2 – 1–2 л/с·км², 3 – 0,5–1 л/с·км², 4 – 0,1–0,5 л/с·км², 5 – менее 0,1 л/с·км², 6 – 50–100 л/с·км, 7 – более 500 л/с·км; 8 – границы и индексы основных эксплуатационных гидрогеологических подразделений; 9 – границы территорий с различными модулями прогнозных эксплуатационных ресурсов; 10 – водоносный комплекс отложений юры (песчаники, алевролиты, угли); 11 – водоносный комплекс отложений нижнего кембрия (доломиты, известняки); 12 – площади распространения подземных вод с природным качеством, не отвечающим санитарно-эпидемиологическим правилам и нормам по минерализации, жесткости, железу или марганцу; 13 – источники загрязнения подземных вод, промышленные объекты (тяжелые металлы, хлор, водород, цианиды, мышьяк): 1 – завод «Химик», 2 – мышьяковый завод; 14 – месторождения питьевых подземных вод (цифры вверху – номер месторождения и индекс водовмещающих пород; слева в числителе – утвержденные запасы, тыс. м³/сут., в знаменателе – запасы для промышленного освоения; справа в числителе – водоотбор, тыс. м³/сут., в знаменателе – компоненты, не соответствующие предельно допустимым концентрациям относительно санитарно-эпидемиологических правил и норм): 1 – Нотское месторождение, 2 – Новомальтинское месторождение; 15, 16 – условия защищенности подземных вод:

15 – условно защищенные, 16 – защищенные; 17 – исследуемая территория

Fig. 1. The map of the predicted operational resources of the town of Svirsk⁶:

1–7 – linear modules: 1 – 2–5 l/s·km², 2 – 1–2 l/s·km², 3 – 0.5–1 l/s·km², 4 – 0.1–0.5 l/s·km², 5 – less than 0.1 l/s·km², 6 – 50–100 l/s·km, 7 – more than 500 l/s·km; 8 – boundaries and indices of the main operational hydrogeological units; 9 – boundaries of the territories with different modules of predicted operational resources; 10 – water-bearing complex of Jurassic deposits (sandstones, siltstones, coals); 11 – aquifer complex of the Lower Cambrian deposits (dolomites, limestones); 12 – distribution areas of groundwater with a natural quality that does not meet sanitary and epidemiological rules and standards for mineralization, hardness, iron or manganese; 13 – sources of groundwater pollution, industrial facilities (heavy metals, chlorine, hydrogen, cyanides, arsenic): 1 – Khimik Plant, 2 – arsenic plant; 14 – deposits of drinking groundwater (numbers at the top – deposit number and index of water-bearing rocks; numbers on the left in the numerator – approved reserves, thousand m³/day, in the denominator – reserves for industrial development; on the right in the numerator – water withdrawal, thousand m³/day, in the denominator – components that do not meet the maximum permissible concentrations relative to sanitary and epidemiological rules and norms): 1 – Notskoye deposit, 2 – Novomal'tinskoye deposit; 15, 16 – groundwater protection conditions: 15 – conditionally protected, 16 – protected; 17 – area under investigation

⁶ Материалы Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды 2012 г.

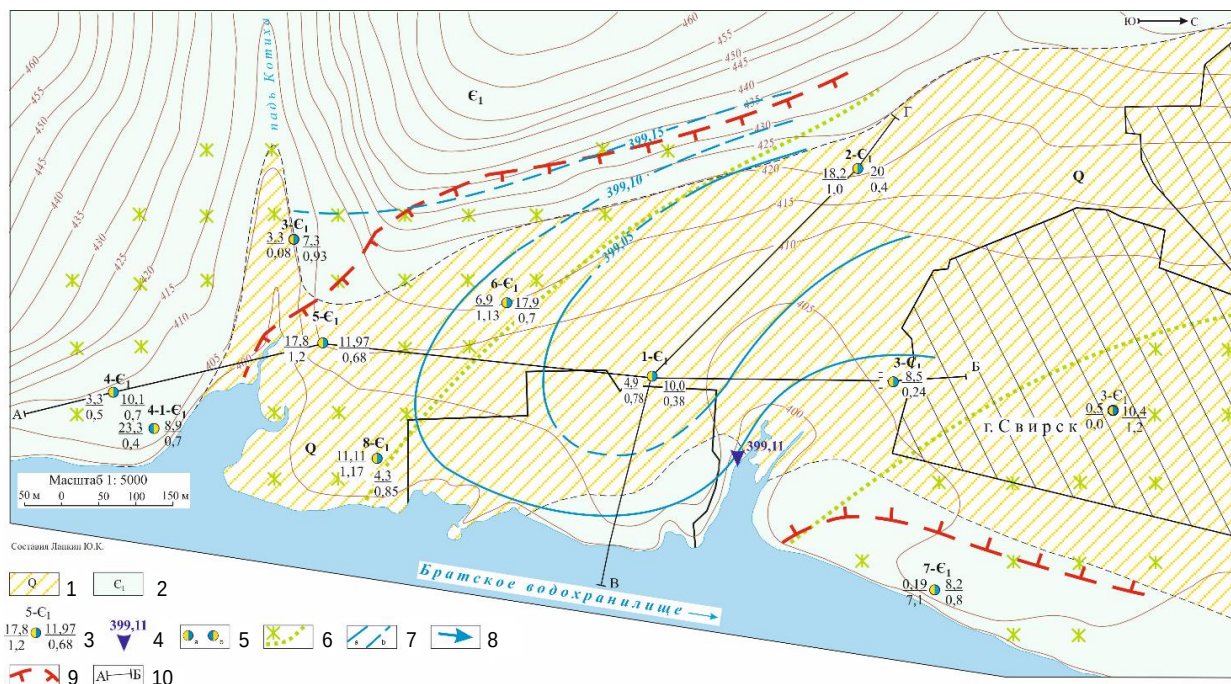


Fig. 2. Гидрогеологическая карта Свирского месторождения пресных подземных вод⁷:

1 – слабоводоносный комплекс четвертичных отложений (суглинки); 2 – водоносный комплекс карбонатных отложений нижнего кембрия (доломиты); 3 – гидрогеологическая скважина (цифры вверху – номер и геологический индекс водовмещающих пород; слева в числителе – дебит, л/с, в знаменателе – понижение, м; справа в числителе – глубина залегания уровня воды, м, в знаменателе – минерализация, г/л; окраска соответствует химическому составу воды); 4 – репер на урезе водохранилища (цифра – абсолютная отметка уровня воды, м); 5 – состав подземных вод: а – сульфатно-гидрокарбонатный, б – гидрокарбонатно-сульфатный; 6 – граница области распространения подземных вод с повышенной жесткостью; 7 – гидроизогипсы на 24 октября 2011 г.: а – установленные, б – предполагаемые; 8 – направление движения подземных вод; 9 – контур тектонической зоны дробления; 10 – линия гидрогеологического разреза

Fig. 2. The hydrogeological map of the Svirsk deposit of fresh groundwater⁷:

1 – weakly water-bearing complex of Quaternary deposits (loams); 2 – aquifer complex of carbonate deposits of the Lower Cambrian (dolomites); 3 – hydrogeological well (numbers at the top – the number and geological index of water-bearing rocks; on the left in the numerator – flow rate, l/s, in the denominator – lowering, m; on the right in the numerator – the depth of the water level, m, in the denominator – mineralization, g/l; color corresponds to the chemical composition of water); 4 – benchmark at the edge of the reservoir (figure – absolute mark of the water level); 5 – groundwater composition: a – sulfate-hydrocarbonate, b – hydrocarbonate-sulfate; 6 – boundary of the distribution area of groundwater with increased rigidity; 7 – hydroisohypses as of October 24, 2011: a – determined, b – assumed; 8 – groundwater flow direction; 9 – contour of the tectonic crush zone; 10 – line of the hydrogeological section

Результаты исследования и их обсуждение

Закарстованные карбонатные отложения нижнего кембрия характеризуются высокими фильтрационными показателями. В процессе опытно-фильтрационных работ дебит скважин изменялся от 4,88 л/с (422 м³/сут.) до 18,2 л/с (1572 м³/сут.) при понижениях соответственно 0,78–1 м. Коэффициент водопроницаемости составил 1284–2500 м²/сут., коэффициент фильтрации изменялся от 44 до 220 м/сут. Карсто-

вый коллектор также имеет высокий коэффициент активной водоотдачи, который составляет 0,2⁸.

Запасы месторождения питьевых подземных вод по категории С₂ составляют 10 тыс. м³/сут., прогнозные ресурсы категории Р₁ – 46,9 тыс. м³/сут. Общее количество оцененных запасов и прогнозных ресурсов питьевых подземных вод водоносного комплекса карбонатных отложений нижнего кембрия составляет 56,9 тыс. м³/сут.⁹.

⁷ Материалы Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды 2012 г.

⁸ Ланкин Ю.К. Отчет о результатах работ по объекту «Поиски подземных вод для обеспечения водоснабжения г. Свирска Иркутской области» с оценкой запасов питьевых подземных вод по Свирскому месторождению по состоянию на 01.07.2012 г. Иркутск, 2012.

⁹ Там же.

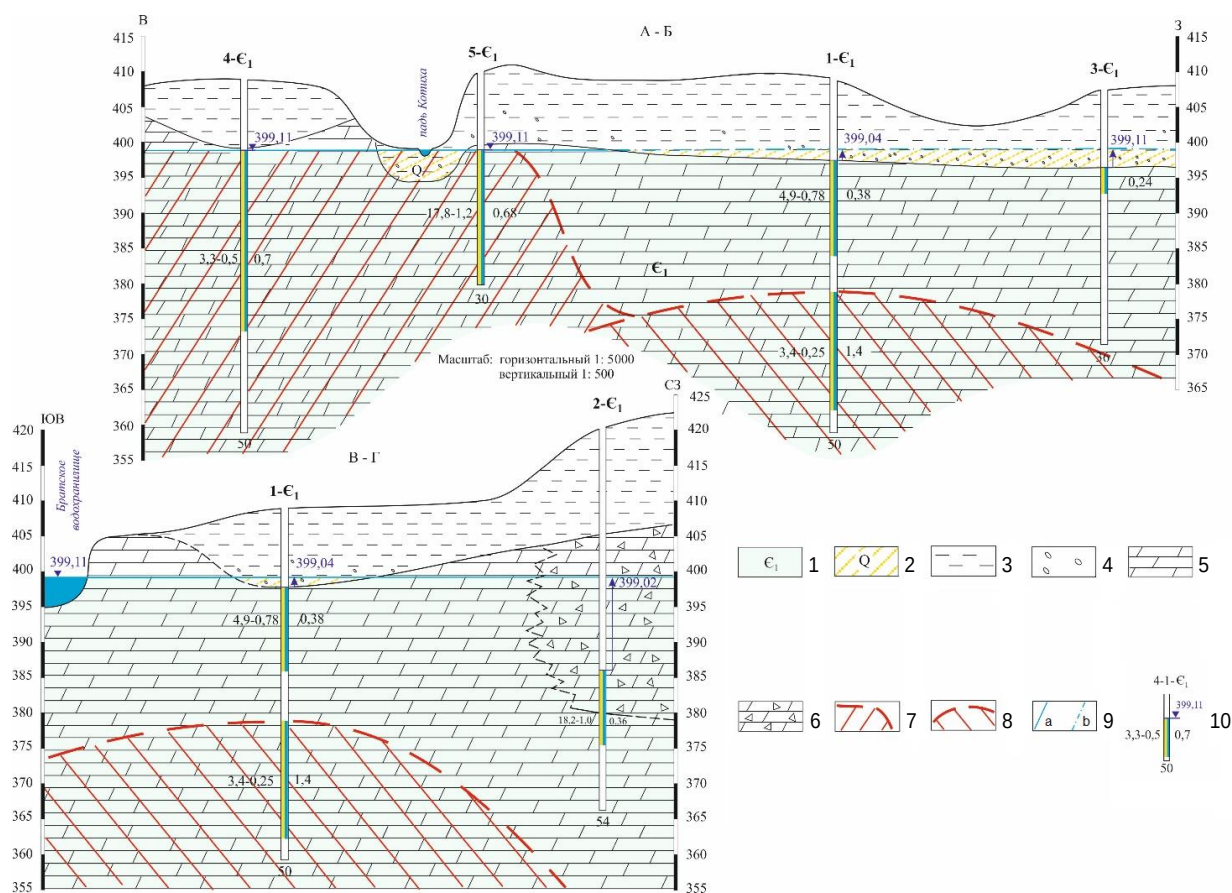


Fig. 3. Hydrogeological sections to the hydrogeological map of the Svirsk deposit of fresh groundwater (see fig. 2)¹⁰:

1 – водоносный комплекс карбонатных отложений нижнего кембрия; 2 – слабоводоносный комплекс четвертичных аллювиальных отложений; 3 – суглинки; 4 – галечник; 5 – доломиты, известняки; 6 – брекчии; 7 – зона подземных вод с жесткостью, превышающей питьевые нормативы; 8 – зона подземных вод с повышенной жесткостью и минерализацией, превышающими питьевые нормативы; 9 – уровень подземных вод: а – грунтовых, b – напорных; 10 – скважина (цифры вверху – номер и индекс возраста водовмещающих пород, внизу – глубина, м, слева – дебит, л/с, и понижение, м, справа – минерализация, г/л; у треугольника или стрелки абсолютная отметка уровня подземных вод, м, приведена по состоянию на 24 октября 2010 г.; цветом показан сульфатно-гидрокарбонатный химический состав подземных вод)

Fig. 3. Hydrogeological sections to the hydrogeological map of the Svirsk deposit of fresh groundwater (see fig. 2)¹⁰:

1 – aquifer complex of carbonate deposits of the Lower Cambrian; 2 – weakly water-bearing complex of Quaternary alluvial deposits; 3 – loams; 4 – pebble; 5 – dolomites, limestones; 6 – breccias; 7 – groundwater zone with the hardness exceeding drinking water standards; 8 – zone of underground waters with increased hardness and mineralization exceeding drinking standards; 9 – groundwater level: a – groundwater, b – head; 10 – well (figures at the top – number and age index of water-bearing rocks, at the bottom – depth, m, on the left – flow rate, l/s, and lowering, m, on the right – mineralization, g/l; the triangle or arrow has the absolute mark of the groundwater level, m, as of October 24, 2010; the color indicates the sulfate-hydrocarbonate chemical composition of groundwater)

По составу подземные воды Свирского месторождения подземных вод сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые или кальциевые-магниевые. Минерализация изменяется от 0,4 до 0,7 г/л, жесткость – от 4 до 7 ммоль/л¹¹. С глубин скважин более 30 м подземные воды

на данной территории имеют повышенную минерализацию, превышающую 1 г/л. За пределами зоны тектонического дробления качество подземных вод также не отвечает питьевым требованиям по жесткости, нередко и минерализации [10].

¹⁰ Материалы Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды 2012 г.

¹¹ Ланкин Ю.К. Отчет о результатах работ по объекту «Поиски подземных вод для обеспечения водоснабжения г. Свирска Иркутской области» с оценкой запасов питьевых подземных вод по Свирскому месторождению по состоянию на 01.07.2012 г. Иркутск, 2012.

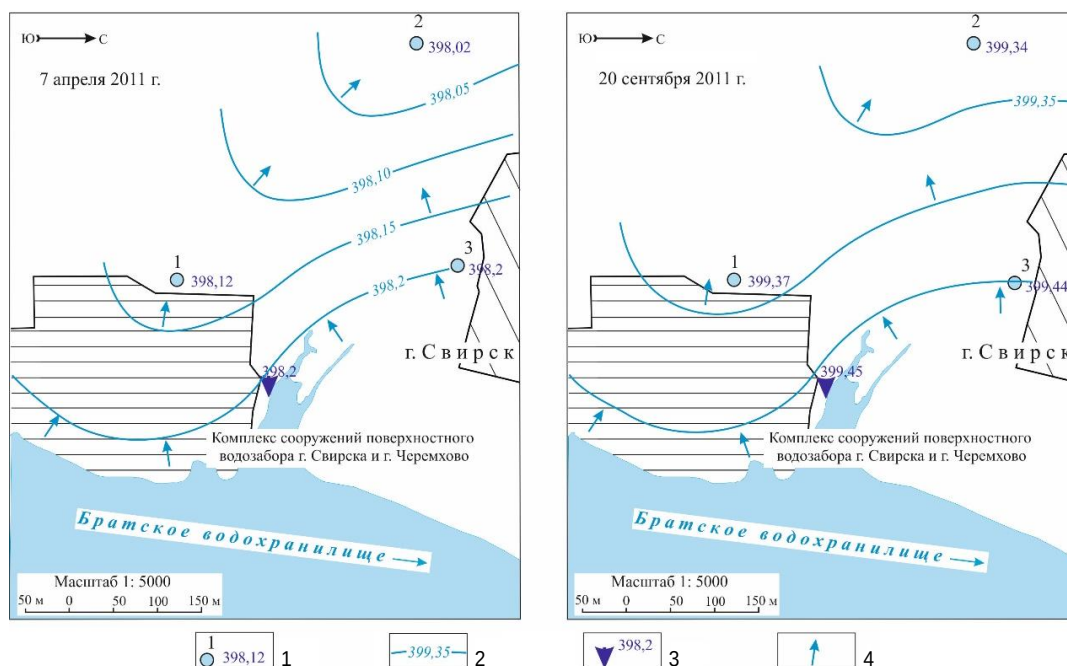


Fig. 4. Схемы гидроизогипс при минимальных и максимальных уровнях поверхностных и подземных вод¹²:

1 – скважина (цифры вверху – номер, слева – абсолютная отметка уровня подземных вод, м;
2 – гидроизогипсы; 3 – репер на водохранилище (цифра – абсолютная отметка уровня водохранилища, м);
4 – направление движения подземных вод

Fig. 4. Diagrams of hydroisogypsum at minimum and maximum levels of surface and groundwater¹²:

1 – well (figures at the top – number, on the left – absolute groundwater level mark, m; 2 – hydroisohypses;
3 – benchmark on the reservoir (the figure is the absolute mark of the level of the reservoir, m);
4 – groundwater flow direction

Таким образом, благоприятные условия для формирования исследуемого месторождения складывались под влиянием неотектонических особенностей [7]. Свирское месторождение находится в локальном неотектоническом понижении, которое, в свою очередь, расположено в более крупном неотектоническом поднятии¹³ [1, 2, 22, 23]. Вследствие этого на территории вблизи месторождения прослеживается купол соленоватых вод, разгружающихся в р. Ангару. В прибрежной зоне водохранилища питание поверхностным водоемом хорошего карбонатного коллектора нижнекембрийских отложений, имеющего высокие фильтрационные показатели, происходит ограниченно – лишь на отдельных участках. Таким участком и является Свирское месторождение. Здесь поток подземных вод направлен в сторону склона от акватории и

возможно получение фильтрационных вод водохранилища.

Закключение

На основании вышеизложенного авторами сделан вывод о том, что неотектонические условия являются одним из факторов формирования запасов месторождений пресных подземных вод, благодаря которым сформировались особые гидрогеологические условия. За счет вытянутой в меридиональном направлении зоны закарстованных, сильно трещиноватых карбонатных пород, обладающей высокими фильтрационными свойствами, отделенной от реки слабопроницаемым «барьером» – Свирской гидравлической депрессией, а также обратного уклона зеркала подземных вод от водохранилища в сторону склона происходит фильтрация потока под-

¹² Материалы Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды 2012 г.

¹³ Информационный отчет по разработке предварительной основы обновленной легенды Государственных гидрогеологических карт Ангаро-Ленского артезианского бассейна масштаба 1:200000 за период работ 2000–2001 гг. / отв. исп. Ю.К. Ланкин // Иркутский территориальный центр государственного мониторинга геологической среды. Иркутск, 2002.



земных вод из Братского водохранилища. В результате благодаря наличию постоянного питания водоносного горизонта за счет привлекаемых ресурсов обеспечиваются необходимый объем и качество извлекаемой воды [21]. Свирское месторождение пресных под-

земных вод служит ярким примером того, что значительные запасы пресных подземных вод, достаточные для удовлетворения водопотребности крупных населенных пунктов, формируются за счет боковой фильтрации поверхностных вод.

Список источников

1. Кураничева А.И., Ланкин Ю.К. Неотектонические особенности формирования Кийского месторождения питьевых подземных вод // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXIX Всерос. молодеж. конф. (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2021. С. 151–152. <https://elibrary.ru/evkdm1>.
2. Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О. Неотектонические условия формирования и локализация запасов подземных вод переуглубленных участков долины реки Кий // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 253–260. <https://elibrary.ru/kzovnv>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-253-260>.
3. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Готов В.Е., Иванова Т.П., Кулаков В.В., Ланкин Ю.К. [и др.]. Состояние питьевого водоснабжения на базе подземных вод в Сибири и на Дальнем Востоке // Подземные воды востока России: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXII Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Новосибирск, 18–22 июня 2018 г.). Новосибирск: Изд-во НГУ, 2018. С. 4–20. <https://elibrary.ru/utrvft>.
4. Блохин Ю.И., Лунова Т.Е. Мониторинг промышленного загрязнения подземных вод на территории Иркутской области // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 18–22 июня 2012 г.). Иркутск: Географ, 2012. С. 445–449.
5. Шенькман Б.М. Гидрогеопургология промышленных зон Иркутской области // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 18–22 июня 2012 г.). Иркутск: Географ, 2012. С. 499–503.
6. Зекцер И.С., Каримова О.А., Четверикова А.В. Роль подземных вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении городского населения // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXI Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Якутск, 22–28 июня 2015 г.). Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2015. С. 32–34.
7. Лунова Т.Е., Ланкин Ю.К. Морфотектонические условия локализации ресурсов подземных вод в Ангара-Ленском артезианском бассейне // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XVIII Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 19–23 июня 2006 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. С. 281–284.
8. Материалы Всесоюз. совещ. по геоморфологии и неотектонике Сибири и Дальнего Востока. В 3 т. Т. II. Проблемы геоморфологии и неотектоники орогенных областей Сибири и Дальнего Востока / отв. ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1968. 366 с.
9. Малич Н.С. Тектоническое развитие чехла Сибирской платформы. М.: Недра, 1975. 215 с.
10. Могилович А.Г. Перспективы поисков пресных подземных вод в Черемховском Приангарье (Свирское месторождение подземных вод) // Месторождения подземных вод Иркутской области. Методика поисков, разведки и оценки запасов: сб. ст. / ред. Е.В. Пиннекер, П.И. Трофимук. Л.: Недра, 1974. С. 132–135.
11. Гидрогеология СССР / глав. ред. А.В. Сидоренко. Т. XIX. Иркутская область / ред. тома В.Г. Ткачук. М.: Недра, 1968. 496 с.
12. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 170 с.
13. Кирюхин В.А., Норова Л.П. Переуглубленные долины – особые элементы гидрогеологической среды // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 18–22 июня 2012 г.). Иркутск: Географ, 2012. С. 82–86.
14. Шенькман Б.М., Шенькман И.Б. Локализация подземного стока в Ангара-Ленском артезианском бассейне // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 18–22 июня 2012 г.). Иркутск: Географ, 2012. С. 408–412.
15. Степанов В.М. Введение в структурную гидрогеологию. М.: Недра, 1989. 228 с.
16. Дэвис С., де Уист Р. Гидрогеология. Т. II / пер. с англ.; ред. В.Н. Кунин, И.С. Зекцер. М.: Мир, 1970. 255 с.
17. Church M., Ferguson R.I. Morphodynamics: rivers beyond steady state // Water Resources Research. 2015. Vol. 51. Iss. 4. P. 1883–1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>.
18. Wright N., Crosato A. The hydrodynamics and morphodynamics of rivers // Treatise on Water Science. 2011. Vol. 2. P. 135–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00033-6>.
19. Syvitski J.P.M., Slingerland R.L., Burgess P., Murray A.B., Wiberg P., Tucker G., Voinov A. Morphodynamic models: an overview // River, coastal and estuarine morphodynamics / eds. C.A. Vionnet, M.H. Garcia, E.M. Latrubesse, G.M.E. Perillo. London: Taylor & Francis, 2010. P. 3–20.
20. Auge M. Hydrogeology of plains. Cham: Springer, 2016. 73 p.
21. Treatise on geomorphology / ed. J.F. Shroder. San



Diego: Academic Press, 2013. 6386 p.

22. Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Вахромеев А.Г. Особенности формирования месторождения пресных подземных вод Черемуховый куст (Иркутский артезианский бассейн) // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Геонауки-2022». Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022.

С. 12–19. <https://elibrary.ru/phrkij>.

23. Кураничева А.И., Ланкин Ю.К. Особенности формирования Зиминского месторождения пресных подземных вод (Ангара-Ленский артезианский бассейн) // Молодые – наукам о Земле: тезисы докл. X Междунар. науч. конф. молодых ученых. (г. Москва, 31 марта – 1 апреля 2022 г.). М.: Изд-во МГРИ, 2022. В 7 т. Т. 3. С. 26–31. <https://elibrary.ru/cphivd>.

References

1. Kuranicheva A.I., Lankin Yu.K. Neotectonic formation features of the Kitoy deposit of drinking groundwater. In: *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy XXIX Vseros. molodezh. konf. = Lithospheric structure and geodynamics: materials of 29th All-Russian youth conference*. 11–126 May 2021, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2021, p. 151–152. (In Russ.). <https://elibrary.ru/evkdml>.

2. Kuranicheva A.I., Lankin Y.K., Naumova O.O. Neotectonic formation and localization conditions of groundwater reserves in over-deepened sections of the Kitoy River valley. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):253-260. (In Russ.). <https://elibrary.ru/kzovnv>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-253-260>.

3. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Glotov V.E., Ivanova T.P., Kulakov V.V., Lankin Yu.K., et al. Drinking groundwater supply in Siberia and the far east. In: *Podzemnye vody vostoka Rossii: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground waters of the East of Russia: materials of the All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia (The 22nd Meeting on Groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2018, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2018, p. 4–20. (In Russ.). <https://elibrary.ru/utrvft>.

4. Blokhin Yu.I., Luneva T.E. Monitoring industrial pollution of underground waters in the Irkutsk region. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia (The 20th Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2012, Irkutsk. Irkutsk: Geograf; 2012, p. 445–449. (In Russ.).

5. Shen'kman B.M. Hydrogeopurgology of industrial zones of the Irkutsk region. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on groundwater of the East of Russia (The 20th Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2012, Irkutsk. Irkutsk: Geograf; 2012, p. 499–503. (In Russ.).

6. Zektser I.S., Karimova O.A., Chetverikova A.V. The role of groundwater in domestic drinking water supply of urban population. In: *Fundamental'nye i prikladnye problemy gidrogeologii: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXI Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Fundamental*

and applied problems of hydrogeology: materials of All-Russian Meeting on Groundwater of the East of Russia (The 21st Meeting on groundwater of Siberia and the Far East). 22–28 June 2015, Yakutsk. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2015, p. 32–34. (In Russ.).

7. Luneva T.E., Lankin Yu.K. Morphotectonic conditions for groundwater resource localization in the Angara-Lena artesian basin. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vse-ros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XVIII Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian Meeting on Groundwater of the East of Russia (The 18th Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 19–23 June 2006, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2006, p. 281–284. (In Russ.).

8. Florensov N.A. Proceedings of the All-Union meeting on geomorphology and neotectonics of Siberia and the Far East. In 3 vol. Vol. 2. *Problems of geomorphology and neotectonics of the orogenic regions of Siberia and the Far East*. Novosibirsk: Nauka; 1968. 366 p. (In Russ.).

9. Malich N.S. *Tectonic development of the Siberian platform cover*. Moscow: Nedra; 1975. 215 p. (In Russ.).

10. Mogilevich A.G. Fresh groundwater prospecting potential in the Cheremkhovo Angara region (Svirsk groundwater deposit). In: *Mestorozhdeniya podzemnykh vod Irkutskoi oblasti. Metodika poiskov, razvedki i otsenki zasposov = Groundwater deposits of the Irkutsk region. Methods of reserve prospecting, exploration and evaluation*. Leningrad: Nedra; 1974, p. 132–135. (In Russ.).

11. Tkachuk V.G. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 19. Irkutsk region*. Moscow: Nedra; 1968. 496 p. (In Russ.).

12. Pinneker E.V., Pisarskii B.I., Lomonosov I.S., Koldysheva R.Ya., Didenko A.A., Sherman S.I. *Hydrogeology of the Baikal Region*. Moscow: Nauka; 1968. 170 p. (In Russ.).

13. Kiryukhin V.A., Norova L.P. Overdeepened valleys as special elements of the hydrogeological environment. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia (The 20th Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2012, Irkutsk. Irkutsk: Geograf; 2012, p. 82–86. (In Russ.).

14. Shen'kman B.M., Shen'kman I.B. Underground runoff localization in the Angara-Lena artesian basin. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia (The 20th Meeting on ground-*



water of Siberia and the Far East). 18–22 June 2012, Irkutsk. Irkutsk: Geograf; 2012, p. 408–412. (In Russ.).

15. Stepanov V.M. *Introduction to structural hydrogeology*. Moscow: Nedra; 1989. 228 p. (In Russ.).

16. Davis S.N., de Wiest R.J.M. *Hydrogeology*. Vol. 2; 1966. 463 p. (Russ. ed.: *Gidrogeologiya*. Moscow: Mir; 1970. 255 p.).

17. Church M., Ferguson R.I. Morphodynamics: rivers beyond steady state. *Water Resources Research*. 2015; 51(4):1883-1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>.

18. Wright N., Crosato A. The hydrodynamics and morphodynamics of rivers // *Treatise on Water Science*. 2011;2:135-156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00033-6>.

19. Syvitski J.P.M., Slingerland R.L., Burgess P., Murray A.B., Wiberg P., Tucker G., Voinov A. Morphodynamic models: an overview. In: Vionnet C.A., Garcia M.H., Latruesse E.M., Perillo G.M.E. (eds.). *River, coastal and estuarine morphodynamics*. London: Taylor & Francis; 2010, p. 3–20.

20. Auge M. *Hydrogeology of plains*. Cham: Springer; 2016. 73 p.

21. Shroder J.F. *Treatise on geomorphology*. San Diego: Academic Press; 2013. 6386 p.

22. Kuranicheva A.I., Lankin Yu.K., Naumova O.O., Vakhromeev A.G. Formation features of the fresh groundwater deposit Cheremukhov Kust (Irkutsk artesian basin). In: *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Geonauki-2022" = Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research: materials of the International scientific and technical conference. Geosciences-2022*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022, p. 12–19. (In Russ.). <https://elibrary.ru/phrkij>.

23. Kuranicheva A.I., Lankin Yu.K. Formation features of the Zima deposit of fresh groundwater (Angara-Lena artesian basin). In: *Molodye – naukam o Zemle: tezisy dokl. X Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh = The Young for the Earth Sciences: abstracts of the 10th International scientific conference of young scientists*. 31 March – 1 April 2022, Moscow. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 2022, in 7 vol., vol. 3, p. 26–31. (In Russ.). <https://elibrary.ru/cphivd>.

Информация об авторах / Information about the authors



Кураничева Анна Игоревна,
аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ kuranicheva.ai@mail.ru
Anna I. Kuranicheva,
Postgraduate Student,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ kuranicheva.ai@mail.ru



Ланкин Юрий Константинович,
ведущий специалист,
Территориальный центр государственного мониторинга состояния недр
по Иркутской области Сибирского регионального центра государственного
мониторинга состояния недр – филиала ФГБУ «Гидроспецгеология»,
г. Иркутск, Россия,
yur-lankin@yandex.ru
Yuriy K. Lankin,
Leading Specialist,
Territorial Center for State Monitoring of the Subsoil State in the Irkutsk Region
of the Siberian Regional Center for State Monitoring of the Subsoil State
(branch of the Federal State Budget Institution "Gidrospegeologiya"),
Irkutsk, Russia,
yur-lankin@yandex.ru



Наумова Ольга Олеговна,
специалист,
Территориальный центр государственного мониторинга состояния недр
по Иркутской области Сибирского регионального центра государственного
мониторинга состояния недр – филиала ФГБУ «Гидроспецгеология»,
г. Иркутск, Россия,
jalo_1985@mail.ru



Olga O. Naumova,

Specialist,

Territorial Center for State Monitoring of the Subsoil State in the Irkutsk Region
of the Siberian Regional Center for State Monitoring of the Subsoil State
(branch of the Federal State Budget Institution "Gidrospetsgeologiya"),
Irkutsk, Russia,
jalo_1985@mail.ru



Верхозина Елизавета Сергеевна,

специалист,

Территориальный центр государственного мониторинга состояния недр
по Иркутской области Сибирского регионального центра государственного
мониторинга состояния недр – филиала ФГБУ «Гидроспецгеология»,
г. Иркутск, Россия,
olicava@mail.ru

Elizaveta S. Verkhovina,

Specialist,

Territorial Center for State Monitoring of the Subsoil State in the Irkutsk Region
of the Siberian Regional Center for State Monitoring of the Subsoil State
(branch of the Federal State Budget Institution "Gidrospetsgeologiya"),
Irkutsk, Russia,
olicava@mail.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 24.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 08.06.2023.

The article was submitted 24.04.2023; approved after reviewing 24.05.2023; accepted for publication 08.06.2023.



Научная статья

УДК 550.4:550.8

<https://elibrary.ru/ranysc>

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>

Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения

Ю.И. Тарасова^а, А.Е. Будяк^б

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

^{а,б}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Холоднинское колчеданно-полиметаллическое месторождение (Байкало-Патомское нагорье, Россия) открыто в 1968 г., но до настоящего момента вопросы его генезиса остаются дискуссионными. Предполагается, что эксплозивная деятельность вулканических аппаратов южной части Байкало-Муйской зоны, а также подводные эксгаляции зоны рассеянного спрединга задугового бассейна с большой вероятностью могли оказывать влияние на геохимические особенности амагматических отложений Бодайбинской и Патомской зон. Для исследований влияния подводной гидротермальной деятельности на геохимические особенности неопротерозойских углеродсодержащих осадков Байкальской горной области была выбрана Олоkitская зона, являющаяся фрагментом спрединговой зоны задугового бассейна. Согласно геохимическим параметрам, отложения итыkitской и ондокской свит, вмещающих Холоднинское месторождение, попадают в область осадконакопления палеобассейнов дальнетайгинского времени. Проведенное сопоставление развития сульфидной минерализации рудных объектов Бодайбинской и Олоkitской структурно-формационных зон позволяет сделать предположение о единстве процессов формирования месторождений в пределах Байкальской горной области. Наличие фрамбоидального пирита указывает на то, что ранние этапы формирования руд Холоднинского гидротермально-стратиформного полиметаллического месторождения являлись синхронными с осадконакоплением. Источником обогащения рудной зоны месторождения цинком, свинцом, серебром и другими элементами, свойственными для низко- и среднетемпературных ассоциаций, являлся гидротермальный раствор зоны рассеянного спрединга задуговых бассейнов. Вероятно, эксплозивная и эксгаляционная деятельности южной Байкало-Муйской зоны в пределах исследуемого региона имела распространение и дальше в северном направлении, тем самым оказывая влияние на формирование сидерохалькофильной геохимической специализации амагматических черносланцевых толщ Бодайбинской и Патомской зон.

Ключевые слова: колчеданно-полиметаллические руды, Байкало-Муйская зона, Олоkitская зона, Холоднинское месторождение

Финансирование: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проекту IX.130.3.1 (№ 0284-2021-0001). Работа осуществлена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

Для цитирования: Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 201–211. <https://elibrary.ru/ranysc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>.

Original article

Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone

Yulia I. Tarasova^а, Alexander E. Budyak^б

^{а,б}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{а,б}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit (Baikal-Patom plateau, Russia) was discovered in 1968, but the questions of its genesis still remain controversial. It is assumed that the explosive activity of volcanic apparatuses of the southern part of the Baikal-Muya zone as well as underwater exhalations of the scattered spreading zone of the back-arc basin could have most likely influenced the geochemical features of amagmatic deposits of the Bodaibo and Patom zones.

© Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., 2023



To investigate the influence of underwater hydrothermal activity on the geochemical features of Neoproterozoic carbon-bearing sediments of the Baikal Mountain region, the Olokit zone, which is a fragment of the spreading zone of the back-arc basin, was chosen. According to the geochemical parameters, the sediments of the Itykit and Ondokskaya formations hosting the Kholodninskoye deposit fall into the sedimentation area of Dalnya Taiga period paleobasins. Having compared the development of sulfide mineralization of ore objects of the Bodaibo and Olokit structural-formation zones, the authors suggest the unity of deposit formation processes within the Baikal Mountain area. The presence of framboidal pyrite indicates that the early stages of ore formation of the Kholodninskoye hydrothermal-stratiform polymetallic deposit were synchronous with sedimentation. The source of deposit ore zone enrichment with zinc lead, silver and other elements typical for low- and medium-temperature associations was a hydrothermal solution of the scattered spreading zone of back-arc basins. It is likely that the explosive and exhalation activities of the southern Baikal-Muya zone within the studied region also spread further northward, thus influencing the formation of siderochalcophilic geochemical specialization of amagmatic black shale strata of the Bodaibo and Patom zones.

Keywords: pyrite-polymetallic ores, Baikal-Muya zone, Olokit zone, Kholodninskoye deposit

Funding: The study was carried out as a part of the implementation of the state assignment under the project IX.130.3.1 (no. 0284-2021-0001). The research employed the scientific equipment of the Multiple-Access Center "Isotopic-Geochemical Studies" of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk).

For citation: Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):201-211. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ranysc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>.

Введение

Холоднинское колчеданно-полиметаллическое месторождение, открытое в 1968 г. геологами Бурятского филиала Томского государственного университета, до настоящего момента остается недоизученным с точки зрения генезиса объекта. Согласно проведенному анализу фондовых материалов [1, 2] и статей в периодических изданиях [3–6 и многие другие], посвященных как изучению непосредственно Холоднинского полиметаллического месторождения, так и литолого-геохимической зональности отложения всего Байкало-Патомского палеобассейна в общем и Олоkitской структуры в частности, реконструируется последовательный ряд обстановок осадконакопления, соответствующих задуговому бассейну [7]. В предложенной схеме задуговой бассейн состоит из трех основных частей: из прибрежного шельфа (Патомская зона) – отложений, расположенных севернее Тоодского и Нечерского поднятий, из зоны глубоководного дистального шельфа (Бодайбинская зона) – центральной части Бодайбинского синклиория, а южнее (Муйская зона) – непосредственно из островодужной системы [7–9]. Высказано мнение о том, что эксплозивная деятельность вулканических аппаратов южной части Байкало-Муйской зоны, а также подводные эксгаляции зоны рассеянного спрединга задугового бассейна с большой вероятностью могли оказывать влияние на геохимические особенности амагматических отложений

Бодайбинской и Патомской зон. Для исследования влияния подводной гидротермальной деятельности на геохимические особенности неопротерозойских углеродсодержащих осадков Байкальской горной области была выбрана Олоkitская зона, являющаяся фрагментом спрединговой зоны задугового бассейна. По геохимическим параметрам отложения итыkitской и ондокской свит, вмещающих Холоднинское месторождение, попадают в область осадконакопления дальнетайгинского времени, отложения которого в пределах Бодайбинского района вмещают все известные крупные месторождения золота. При этом геохимический фон отложений дальнетайгинского стратоевня в пределах Байкальской горной области характеризуется халькосидерофильной геохимической специализацией [4].

Принимая во внимание единую структуру, в которую входили Олоkitская, Бодайбинская и Патомская зоны, можно предположить единство процессов формирования рудной минерализации месторождений в пределах данной территории. Таким образом, было выдвинуто предположение, что рудная специфика в пределах рудных объектов всех трех зон имела единый источник полезного компонента, а эволюция минералообразования протекала по однотипному сценарию, связанному с общей для всех историей геодинамической эволюции региона. В данной статье приводятся результаты изучения последовательности ми-



нералообразования Холоднинского месторождения Олоkitской структуры.

Материалы и методы исследования

Холоднинское месторождение находится на севере Прибайкалья и приурочено к юго-восточному крылу Олоkitской структурно-металлогенической зоны. Вмещающими являются интенсивно дислоцированные углеродисто-слюдистые сланцы ондокской свиты верхнепротерозойского возраста. Метаморфизм пород соответствует зеленосланцевой фации (рис. 1).

Рудная зона представляет собой стратиформные колчеданные и колчеданно-полиметаллические залежи, смятые в диагональном направлении совместно с вмещающими их породами. Главными рудными минералами в рудах Холоднинского полиметаллического месторождения являются сфалерит, галенит, пирит, халькопирит, пирротин; реже установлены арсенопирит, тенантит, тетраэдрит, бурнонит, самородное золото, рутил.

Аналитические исследования химического состава пород и руд проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии

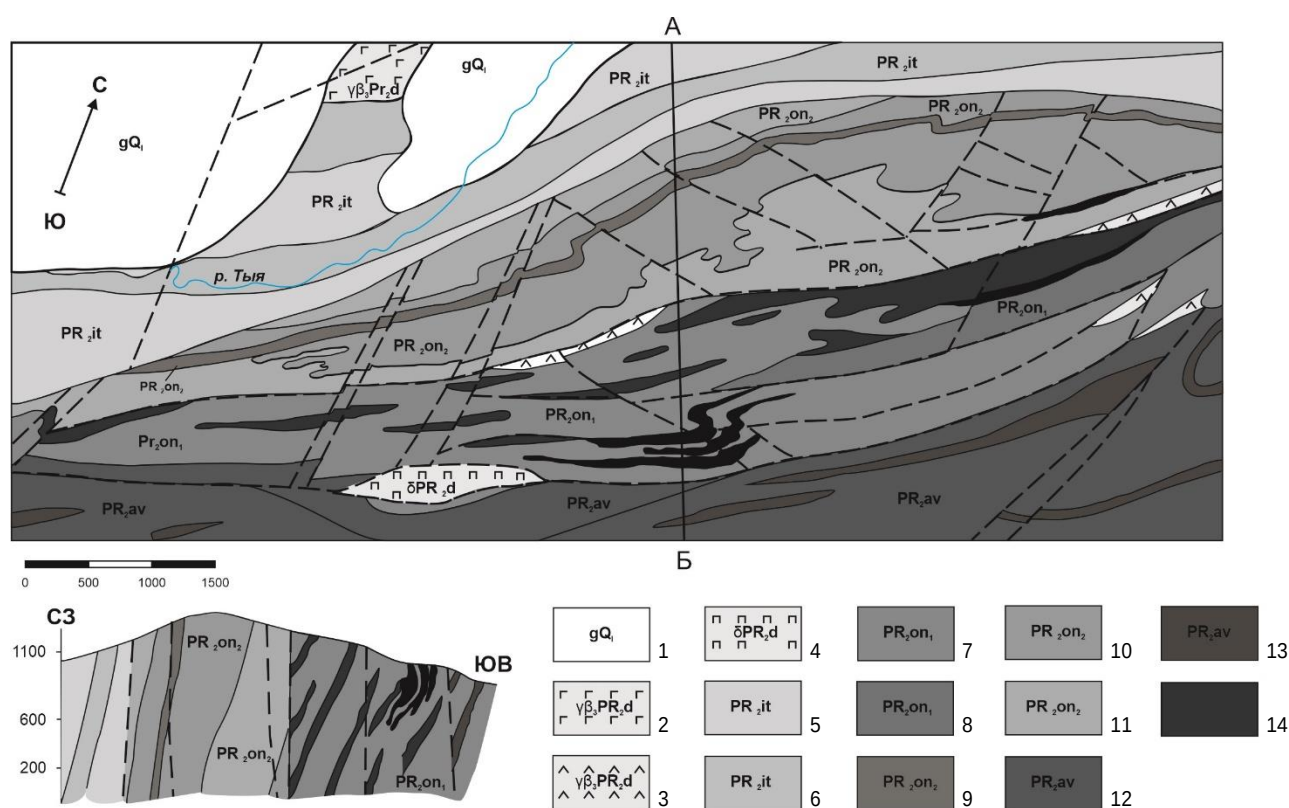


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Холоднинского месторождения [3]:

1 – четвертичные отложения: среднее звено, ледниковые валуны, глыбы, галечники; 2–4 – Давыренский интрузивный комплекс: 2 – третья фаза, габбро, 3 – третья фаза, габбро-диабазы, 4 – первая фаза, апоперидотиты; 5, 6 – итыkitская свита: 5 – кристаллические известняки, 6 – филлитовидные и углистые сланцы; 7–11 – ондокская свита: 7 – гранатсодержащие графит-слюдисто-кварцевые сланцы, 8 – слюдистые кварциты, 9 – графит-слюдисто-кварцевые сланцы, 10 – графит-карбонат-слюдисто-кварцевые сланцы, 11 – графит-слюдисто-известковые метасоматы; 12–14 – аукитская свита: 12 – гранатсодержащие слюдисто-кварцевые сланцы, 13 – метаморфизованные известняки, 14 – кварц-слюдисто-карбонатные метасоматы с гранатом

Fig. 1. Schematic geological map of the Kholodninskoye deposit [3]:

1 – Quaternary sediments: middle part, glacial boulders, blocks, pebbles; 2–4 – Davyren intrusive complex: 2 – the third phase, gabbro, 3 – the third phase, gabbro-diorites, 4 – the first phase, apoperidotites; 5, 6 – Itykit formation: 5 – crystalline limestones, 6 – phyllite and carbonaceous shales; 7–11 – Ondokskaya formation: 7 – garnet-bearing graphite-mica-quartz schists, 8 – micaceous quartzites, 9 – graphite-mica-quartz schists, 10 – graphite-carbonate-mica-quartz schists, 11 – graphite-mica-calcareous metarocks; 12–14 – Aukit formation: 12 – garnet-bearing mica-quartz schists, 13 – metamorphosed limestones, 14 – quartz-mica-carbonate metasomatites with garnet



им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Подготовка материала осуществлялась на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» с линией пробоподготовки в Межрегиональном научно-образовательном центре «Байкал» (г. Иркутск).

Состав минералов и включений был получен с помощью сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3LMU с системами микроанализа Aztec Energy XMax 50+ в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. Ускоряющее напряжение составляло 20 кэВ, размер зонда – 5 нм.

Изотопный анализ серы проводился в Лаборатории стабильных изотопов в Приморском аналитическом центре локального элементного и изотопного анализа Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток) с применением локального лазерного метода с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto [10, 11].

Результаты исследования

С целью восстановления стадийности формирования месторождений Олоkitской структуры были проведены исследования рудной минерализации Холоднинского месторождения. Визуально руды характеризуются переменными соотношениями таких минералов, как пирит, сфалерит и галенит, которые образуют слои, чередующиеся с прослойками вмещающих сланцев мощностью от долей сантиметра до 10 см (рис. 2).

Пирит установлен в виде четырех разно-

видностей. Пирит-1 отмечается в рудах довольно редко, представлен фрамбоидами, встречающимися в виде рассеянной вкрапленности или образующими скопления округлой формы (рис. 3). Также в скоплениях отмечаются идиоморфные кристаллы пирита-2. Пирит-2 корродирует кристаллы пирита-1. В составе таких агрегатов и концентрически-зональных скоплениях отмечаются галенит и сфалерит, развивающиеся в центральной части агрегатов или заполняющие межзерновое пространство между фрамбоидами пирита.

Пирит-3 наиболее часто устанавливается в рудных образцах и представляет собой ориентированные пойкило-гранобластовые агрегаты. При травлении этих агрегатов выявляются реликты пирита-1 и пирита-2 в виде самостоятельных редких зерен (рис. 4) или почковидных и зональных образований. Пирит-3 встречается в сростаниях со сфалеритом, галенитом, халькопиритом, кварцем и карбонатами. Отмечаются как сростания с единичными кристаллами перечисленных минералов, так и совместные сростания всей минеральной ассоциации.

Пирит-4 развит в рудах незначительно и образует равномерную вкрапленность крупных (0,8–3 мм) зерен в полях галенита и сфалерита, образующих шариковые руды. Крупные зерна имеют идиоморфные очертания с округлыми границами. Зерна пирита-4 по краям содержат цепочки закономерно ориентированных включений сфалерита, нередко содержат направленные или изометричные включения галенита.



Рис. 2. Полосчатые (а) и массивные (b) руды Холоднинского месторождения
Fig. 2. Banded (a) and massive (b) ores of the Kholodninskoye deposit



Рис. 3. Фрамбуидальный пирит
Fig. 3. Framboidal pyrite

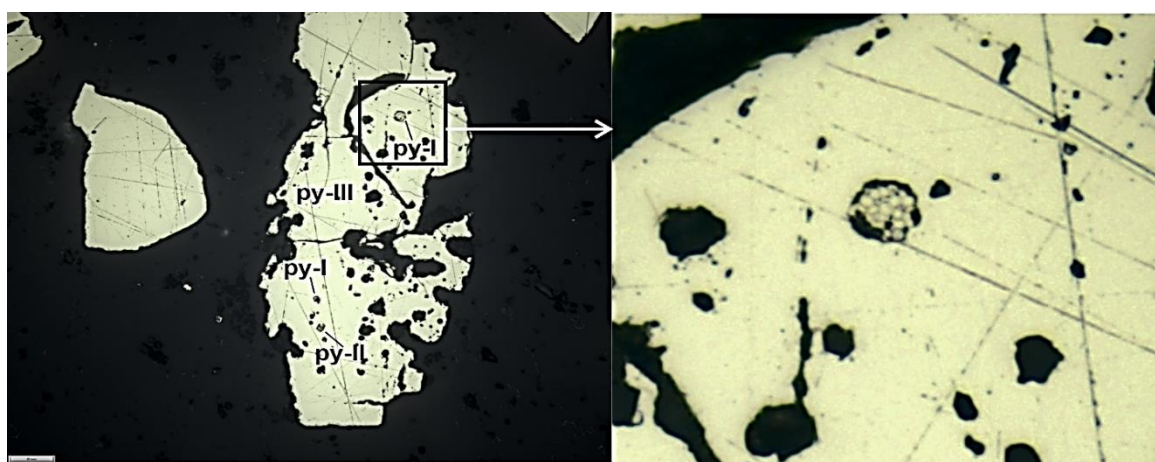


Рис. 4. Реликты пирита-1 и пирита-2 в агрегате пирита-3
Fig. 4. Relicts of pyrite-1 and pyrite-2 in the pyrite-3 aggregate

Состав пирита изучен с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой при содействии лазерной абляции и характеризуется рядом типоморфных особенностей. В пирите установлены примеси меди, серебра, свинца, никеля, кобальта, цинка, мышьяка, золота, таллия и бария (таблица).

Сфалерит представлен двумя разновидностями. Сфалерит-1 развит весьма незначительно и ассоциирует с пиритом-1. Он образует глобулы размером 0,01–0,02 мм, как правило, с оторочкой поперечно-волокнистого графита или выполняет центральные части или отдельные зоны концентрически-зональных и колломорфных образований сульфидов. Глобулы сфалерита совместно с пиритом-1 и пиритом-2 образуют совместные скопления округлой формы. Реликты сфалерита-1 установлены в более крупных агрегатах пирита-3 и сфалерита-2.

Сфалерит-2 образует гнезда размером 0,1–2 мм в ассоциации с пиритом-3, галенитом и халькопиритом. В некоторых зернах сфалерита наблюдается эмульсионная вкрапленность халькопирита, иногда с галенитом. Границы сростаний сфалерита-2 с пиритом-3 ровные и слабо корродированные (рис. 5), с галенитом и халькопиритом – существенно коррозионные.

Халькопирит также представлен двумя морфологическими разновидностями. Халькопирит-1 обнаружен в виде характерной мелкой рассеянной эмульсионной вкрапленности в сфалерите, а также в виде крупных вытянутых выделений, развивающихся по периферии зерен сфалерита-2. Халькопирит-2 – в виде крупных изометричных агрегатов, часто вытянутой формы. Крупные зерна развиваются совместно с рудной ассоциацией, представленной пирротинном, пиритом-3, сфалеритом-2, галенитом, теннантитом.



Состав сульфидов Холоднинского месторождения, ppm Composition of Kholodninskoye deposit sulfides, ppm

Эле- мент	Минерал					
	Py-1,2	Py-3	Py-4	Gln	Cpy	Sp
V	22,9 0,2 – 32	23,33 0,04 – 32	16,12 0,12 – 32	23,36 0,11 – 32	24,1 0,42 – 32	25,77 0,86 – 32
Cr	410,14 0,74 – 352	322 0,42 – 992	67,13 1,95 – 640	1188,7 8 – 19520	212,64 3,52 – 800	535,87 3,52 – 2240
Fe	33951 68152 – 74200	26982 10070 – 100700	26121 12720 – 53000	12761,31 9,88 – 53000	53120 15680 – 150400	10009,6 2368 – 22720
Co	27,23 12,19 – 53	6,08 0,21 – 14,84	3,68 0,21 – 11,66	6,91 0,27 – 24,91	32 32 – 32	25,85 1,25 – 32
Ni	30,54 4,19 – 201,4	7,66 1,06 – 53	11,79 1,17 – 53	10,68 0,12 – 53	16,88 6,08 – 29,76	20,84 0,54 – 32
Cu	36,35 0,93 – 487,6	5,54 1,48 – 42,93	4,84 1,64 – 11,66	8,94 0,66 – 58,3	19360 16640 – 22080	20,93 7,04 – 64
Zn	34,22 2,6 – 201,4	33,07 1,17 – 530	89,41 5,25 – 530	30,35 2,08 – 201,4	150,4 108,8 – 208	136960 118400 – 147200
Ga	39,42 0,27 – 53	47,27 0,08 – 53	41,79 0,10 – 53	13,78 0,12 – 53	24,22 0,9 – 32	8,72 0,54 – 32
Ge	22,54 0,51 – 53	10,26 0,22 – 53	4,67 0,36 – 53	11,52 0,02 – 53	17,44 2,62 – 32	26,01 2,05 – 32
As	76,14 7,95 – 169,6	56,2 7,95 – 238	43,23 7,95 – 95,4	43,29 2,08 – 392,2	16,64 15,04 – 19,84	16,06 5,44 – 38,4
Ag	1,61 Н. о. – 7,95	3,82 0 – 169,6	2,47 0 – 20,14	266,3 3,55 – 699,4	158,16 11,52 – 278,4	70,68 1,57 – 320
Sn	0,22 Н. о. – 1,01	0,17 0 – 1,38	0,21 0 – 1,38	4,45 0,06 – 14,04	10,8 7,04 – 15,68	3,08 Н. о. – 9,6
Sb	10,66 Н. о. – 68,37	7,49 0 – 50,35	12,49 0 – 50,35	188,82 18,02 – 492,7	11,91 0,61 – 41,6	55,04 Н. о. – 156,8
Ba	4,43 Н. о. – 31,27	0,98 0 – 9,33	1,79 0 – 9,33	1,93 0 – 12,67	1,83 0 – 3,23	1,25 Н. о. – 5,76
W	0,02 Н. о. – 0,39	0,01 0 – 0,36	Н. о.	0,1 0 – 0,64	Н. о.	Н. о.
Hg	Н. о.	0,33 Н. о. – 7,05	Н. о.	0,23 Н. о. – 5,14	7,7 Н. о. – 13,12	17,41 Н. о. – 36,8
Pb	103,68 0,39 – 837,4	85,6 0,19 – 874	289,87 101,23 – 874,5	143653,4 1293,2 – 224900	326,63 1,73 – 1248	32409,28 14,4 – 160000
Bi	0,08 0,01 – 0,28	0,03 0,02 – 0,65	0,06 0,01 – 0,65	196,84 0 – 448	0,1 0,06 – 0,42	26,75 0,06 – 133,76
Au	0,04 Н. о. – 0,16	0,05 Н. о. – 0,21	0,04 Н. о. – 0,19	0,02 Н. о. – 0,13	0,04 Н. о. – 0,18	0,14 Н. о. – 0,35

Примечание. Py – пирит, Gln – галенит, Cpy – халькопирит, Sp – сфалерит. Содержания приведены в следующем порядке: в числителе – среднее арифметическое, в знаменателе – диапазон. Н. о. – ниже предела обнаружения.

Галенит формирует крупные аллотриоморфные выделения на контакте с агрегатами сфалерита, пирротина. Агрегаты галенита часто имеют вытянутую форму. В виде включений в галените отмечается пирротин, повторяя морфологию галенита.

Пирротин представлен в виде интерстициальных выделений на границе зерен пирита-3, халькопирита-2, сфалерита-2, галенита. В результате диагностического травления в пир-

ротинных агрегатах выявляются мелкие кубические кристаллики пирита-2, равномерно расположенные в пределах агрегата.

Обсуждение полученных результатов

При изучении рудной минерализации была установлена следующая последовательность образования минералов: на ранней стадии в осадочных толщах были сформированы

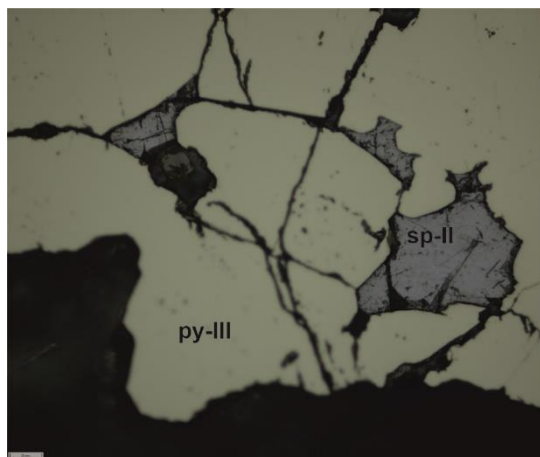


Рис. 5. Включения сфалерита в пирите-3
Fig. 5. Sphalerite inclusions in pyrite-3

микросталлы пирита-1 и пирита-2, образующие сферические агрегаты, близодновременно с ними формировались аналогичные образования сфалерита-1 (рис. 6). Такие выделения пирита-1 и пирита-2 можно отнести к первично образовавшимся из коллоидных растворов, но в дальнейшем претерпевшим частичную перекристаллизацию. Позже при процессах повышения температуры и давления происходило замещение пирита пирротинном с последующей кристаллизацией пирита-3, галенита, халькопирита и сфалерита-2 при постепенном снижении температуры. Формирование пирита-4 происходило при условиях, отличающихся от прерудной и собственно рудной стадий формирования месторождения. Таким образом, при формировании рудной минерализации в пределах Олоkitского прогиба предполагается как минимум три стадии:

1. Стадия поступления гидротермального флюида, обогащенного среднетемпературными халькофильными элементами (свинец, цинк, серебро, сурьма, в меньшей мере золото), в результате чего в области разгрузки гидротермального флюида формируется эксгалляционно-осадочное месторождение.

2. Стадия метаморфического воздействия, которое приводит к перераспределению полезного компонента с отложением рудной минерализации на регрессивном этапе метаморфизма.

3. Пострудная стадия, связанная с наложенными геодинамическими событиями, вероятно, оторванными во времени от основной рудной стадии формирования. На данной стадии происходит формирование пирита-4, не

несущего рудной нагрузки.

Пирит является минералом, образование последовательно сменяющих друг друга генераций которого связано с разными стадиями формирования месторождения. Соответственно, изменение условий отражалось и на характеристиках разновидностей пирита.

Анализ данных о составе генераций пирита позволил выявить ряд типоморфных особенностей:

1. Выделенные разновидности пирита имеют близкие величины отношения серы и железа, однако наблюдается тенденция к увеличению этого отношения от пирита-1 к пириту-4 (см. таблицу).

2. К главной типоморфной особенности пирита следует отнести вариации содержания кобальта и никеля и их отношения. Для пирита-1, пирита-2 и пирита-3 характерно сопоставимое содержание никеля с кобальтом (соотношение кобальта и никеля колеблется в пределах 0,7–1). В пирите-3 содержание кобальта и никеля снижается более чем в пять раз, при этом отношение кобальта и никеля остается в тех же значениях, что и для пирита-1 и пирита-2. В пирите-4 отношение кобальта и никеля снижается до 0,3. Возросшее содержание никеля предполагает изменение *РТ*-условий формирования, что возможно при геодинамической активизации региона, повлекшей за собой метаморфические преобразования. Предложенная последовательность формирования рудной минерализации Холоднинского месторождения не противоречит представлениям о формировании Байкальской горной области [4, 12–20].



ГЕОС, 1999. 163 с.

9. Станевич А.М., Советов Ю.К., Корнилова Т.А., Галушкина И.О. Микрофоссилии и биотопы позднего протерозоя Присаянья (Восточная Сибирь) // Новости палеонтологии и стратиграфии. 2006. Т. 47. № 9. С. 9–19.

7. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747. <https://elibrary.ru/mktvod>.

10. Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. and Levitskii V.I., 2018. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution // Chemical Geology. 2018. Vol. 493. P. 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>.

11. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2019. Vol. 33. Iss. 22. P. 1722–1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>.

12. Chugaev A.V., Chernyshev I.V. Pb-Pb isotopic systematics of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom folded belt (Northern Transbaikalia, Russia) and assessment of the role of the Neoproterozoic crust in their formation // Geochemistry International. 2017. Vol. 55. P. 1010–1021. <https://doi.org/10.1134/S0016702917110040>.

13. Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В. Неоднородность изотопного состава серы пирита на месторождении Сухой Лог и определяющие ее факторы // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 6. С. 786–790. <https://elibrary.ru/ncawex>.

14. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A. [et al]. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia // Geology of Ore Deposits. 2022. Vol. 64. P. 503–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.

15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V., Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source // Geology. 2008. Vol. 36. Iss. 12. P. 971–974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>.

16. Конкин В.Д., Донец А.И., Ручкин Г.В. Минералого-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 52–62. <https://elibrary.ru/kuvrgt>, <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10005>.

17. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia // Economic Geology. 2007. Vol. 102. Iss. 7. P. 1233–1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>.

18. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 119. P. 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

19. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В. [и др.]. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угхан (Байкало-Патомское нагорье) // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 12–17. <https://elibrary.ru/eojdko>, <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>.

20. Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А. [и др.]. Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 1. С. 71–92. <https://elibrary.ru/tgwayx>, <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>.

References

1. Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. *Hydrothermal ore genesis of the ocean floor*. Moscow: Nauka; 2006. 527 p. (In Russ.).

2. Distanov E.G., Kovalev K.R., Ponomarev V.G. Genetic features of the pyrite-polymetallic mineralization of the Northern Baikal region. In: *Geologiya i poleznye iskopayemye v polose BAM Severnogo Pribaikal'ya = Geology and mineral resources in the Baikal-Amur Mainline belt of Northern Baikal region*. Moscow: Nauka; 1983, p. 33–37. (In Russ.).

3. Ruchkin G.V., Donets A.I. Hydrogenic generation concept of ore-forming systems of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata. In: *Fundamental'nye problemy geologii mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh i metallogenii: trudy XXI Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya akad. V.I. Smirnova = Fundamental problems of mineral deposit geology and metal-*

logeny: proceedings of the 21st International scientific conference devoted to the 100th birth anniversary of the Academician V.I. Smirnov. 26–28 January 2010, Moscow. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2010, p. 93–106. (In Russ.).

4. Budyak A.E., Skuzovatov S.Y., Tarasova Y.I., Wang K.L., Goryachev N.A. Common Neoproterozoic – early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335–339. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mimdqw>, <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339>.

5. Dobrovolskaya M.G., Eremin N.A. Metamorphism and the time of the lead-zinc ores formation in the Kholodninskoe deposit (North-Pribaikal area). *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*. 2010;1:30–35. (In Russ.). <https://elibrary.ru/lkyfdv>.



6. Rytsk E.Yu., Shalae V.S., Rizvanova N.G., Krymskii R.Sh., Makeev A.F., Rile G.V. Olokit zone of the Baikal folded region: new isotopic-geochronological and petrogeochemical data. *Geotektonika*. 2002;1:29-41. (In Russ.). <https://elibrary.ru/hltnhi>.

8. Konnikov E.G., Tsygankov A.A., Vrublevskaya T.T. *Baikal-Muya volcano-plutonic belt: structural-material complexes and geodynamics*. Moscow: GEOS; 1999. 163 p. (In Russ.).

9. Stanevich A.M., Sovetov Yu.K., Kornilova T.A., Galushkina I.O. Late Proterozoic microfossils and biotopes adjacent to the Sayan area (East Siberia). *Novosti paleontologii i stratigrafii*. 2006;47(9):9-19. (In Russ.).

7. Nemerov V.K., Stanevich A.M., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A. Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):729-747. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mktvod>.

10. Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. and Levitskiy V.I., 2018. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chemical Geology*. 2018;493:316-326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>.

11. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2019;33(22):1722-1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>.

12. Chugaev A.V., Chernyshev I.V. Pb-Pb isotopic systematics of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom folded belt (Northern Transbaikalia, Russia) and assessment of the role of the Neoproterozoic crust in their formation. *Geochemistry International*. 2017;55:1010-1021. <https://doi.org/10.1134/S0016702917110040>.

13. Dubinina E.O., Ikonnikova T.A., Chugaev A.V. Heterogeneity of the sulfur isotopic composition of pyrite at the Sukhoi Log deposit and its controlling factors. *Doklady Akademii nauk*. 2010;435(6):786-790. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ncawex>.

14. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. In-

dicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2022;64:503-512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.

15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V., Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*. 2008;36(12):971-974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>.

16. Konkin V.D., Donets A.I., Ruchkin G.V. Mineralogical-geochemical types and regional geological special characteristic of stratiform carbonate-hosted lead-zinc deposits. *Otechestvennaya geologiya = National Geology*. 2018;4:52-62. (In Russ.). <https://elibrary.ru/kuvrgt>, <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10005>.

17. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*. 2007;102(7):1233-1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>.

18. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

19. Tarasova Y.I., Budyak A.E., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Blinov A.V., et al. Typomorphism of pyrite from the Ugakhan gold deposit (Baikal-Patom highlands). *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o zemle*. 2022;503(1):12-17. (In Russ.). <https://elibrary.ru/eojdko>, <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>.

20. Palenova E.E., Belogub E.V., Plotinskaya O.Y., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., et al. Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2015;57(1):71-92. (In Russ.). <https://elibrary.ru/tgwayx>, <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>.

Информация об авторах / Information about the authors



Тарасова Юлия Игоревна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
заведующая Лабораторией геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>



Yulia I. Tarasova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Head of the Laboratory of Ore Formation Geochemistry
and Geochemical Methods of Exploration,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>



Будяк Александр Евгеньевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
руководитель департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
заместитель директора по научной работе,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>

Alexander E. Budyak,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Deputy Director for Science,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; одобрена после рецензирования 07.06.2023; принята к публикации 23.06.2023.

The article was submitted 23.05.2023; approved after reviewing 07.06.2023; accepted for publication 23.06.2023.

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Научная статья

УДК 622.012.3; 303.717

<https://elibrary.ru/qkftpf><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-212-225>**Адаптивный интеллектуальный анализ данных
как инструмент для прогнозирования ресурса
узлов горных машин и оборудования****В.А. Храмовских^а, А.Н. Шевченко^б, К.А. Непомнящих^с**^{а-с}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. В современном мире горнодобывающая промышленность является одной из наиболее важных отраслей экономики. Сложные условия работы, высокие нагрузки и необходимость постоянного контроля за техническим состоянием оборудования требуют высокой квалификации специалистов и эффективных инструментов для анализа большого объема данных. Анализ отказов горных машин и оборудования, в свою очередь, является одним из важных процессов для определения и устранения причин отказов с целью повышения надежности и безопасности работы машин и оборудования. Использование современных методов статистической обработки данных позволяет сделать этот процесс более эффективным и точным. Разработка инструмента для анализа отказов горных машин и оборудования может принести значительные выгоды горнодобывающим компаниям. Анализируя данные об отказах оборудования, выявляя первопричины и предоставляя рекомендации по корректирующим действиям, инструмент анализа может помочь предотвратить отказы оборудования, повысить безопасность и производительность. Разработка этого инструмента требует междисциплинарного подхода и должна быть построена таким образом, чтобы быть удобной для пользователя и масштабируемой. В связи с этим целью исследования стало представление способа создания адаптивного инструмента для анализа отказов горных машин на базе программы Microsoft Excel. Авторами рассмотрены основные принципы работы данного инструмента, его функциональный состав и возможности использования при различных условиях эксплуатации горной техники. Значительное внимание уделено описанию основного алгоритма работы программы, который позволяет эффективно обрабатывать большие объемы данных, выдавать точные результаты и отображать их в удобном виде с целью оценки уровня надежности и перехода к прогнозированию ресурса узлов горных машин и оборудования. Дальнейшее улучшение инструмента адаптивного анализа данных о работе горных машин в рамках данного исследования может быть осуществлено путем добавления новых параметров или автоматизации процессов поиска причин отказов с использованием нейросетей.

Ключевые слова: надежность оборудования, остаточный ресурс, анализ отказов, прогнозирование, нейронные сети

Для цитирования: Храмовских В.А., Шевченко А.Н., Непомнящих К.А. Адаптивный интеллектуальный анализ данных как инструмент для прогнозирования ресурса узлов горных машин и оборудования // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 212–225. <https://elibrary.ru/qkftpf>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-212-225>.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Original article

**Adaptive data mining as a tool to predict
mining machinery and equipment assembly life****Vitaliy A. Khramovskikh^а, Aleksey N. Shevchenko^б, Kirill A. Nepomnyashchikh^с**^{а-с}*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

© Храмовских В.А., Шевченко А.Н., Непомнящих К.А., 2023



Abstract. Mining industry is one of the most important economic sectors in the modern world. Complex working conditions, high loads and the need for continuous monitoring of equipment technical condition require highly qualified specialists and effective tools to analyze large data volumes. Failure analysis of mining machinery and equipment is one of the important processes to determine and eliminate the causes of failures in order to improve the reliability and safety of machinery and equipment operation. The use of modern methods of statistical data processing makes this process more efficient and accurate. The development of a tool for failure analysis of mining machines and equipment can be very beneficial to mining companies. By analyzing the data on mining machines and equipment failures, identifying the primary causes of failures and providing corrective recommendations, the analysis tool can prevent equipment failures, improve machine safety and performance. The development of this tool requires an interdisciplinary approach as it should be user-friendly and scalable. In this regard, the purpose of the study is to present a creation method of an adaptive tool for the Microsoft Excel-based analysis of mining machine failures. The authors consider the basic operation principles of this tool, its functional composition and application potential under various operating conditions of mining equipment. Much attention is paid to the description of the main operation algorithm of the program, which makes it possible to efficiently process large volumes of data, produce accurate results and display them in the form convenient for reliability level estimation and transition to the forecasting of mining machinery and equipment assembly life. Further improvement of the tool for adaptive analysis of data on mining machine operation, within the framework of this study, can be performed by adding new parameters or automation of the troubleshooting processes using neural networks.

Keywords: equipment reliability, residual resource, failure analysis, forecasting, neural networks

For citation: Khramovskikh V.A., Shevchenko A.N., Nepomnyashchikh K.A. Adaptive data mining as a tool to predict mining machinery and equipment assembly life. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2023;46(2):212-225. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qkftpf>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-212-225>.

Введение

От технического состояния горных машин зависит производительность и объемы добычи полезных ископаемых, поэтому важно обладать адаптивным инструментом оперативного контроля текущего технического состояния основного и вспомогательного технологического оборудования. Оценку уровня надежности работы горнодобывающих машин в процессе их эксплуатации производят на основании статистических данных [1–3]. В связи с этим остро встает вопрос поиска инструмента для выявления статистических закономерностей возникновения отказов элементов горных машин и оборудования с учетом конкретных режимов эксплуатации и внешних условий. Сбор, обработка и анализ статистической информации об отказах, то есть формирование базы данных, является отправной точкой для установления закономерностей их возникновения, что позволяет произвести классификацию причин отказов по следующим категориям: основные системы горных машин и оборудования, хронология событий, наработка углов и агрегатов, а также другим критериям. Использование результатов анализа открывает возможность перехода к прогнозированию основных показателей уровня надежности горных машин и оборудования, таких как коэффициент технической готовности (КТГ), коэффициент технического исполь-

зования (КИО), наработка на отказ (MTBF), среднее время восстановления (MTTR) и другие. Внедрение предлагаемого адаптивного инструмента на горнодобывающих предприятиях позволит принимать взвешенные решения при планировании горных работ, оптимизировать принятую систему технического обслуживания и ремонта, прогнозировать риски возникновения неблагоприятных событий, а также оптимизировать внутренние бизнес-процессы для обеспечения устойчивого развития предприятий, столь актуальные при проведении перехода к цифровой трансформации горнодобывающей отрасли [4–6].

Материалы и методы исследования

Процедура анализа отказов горных машин и оборудования представляет собой системный подход к изучению неисправностей машин и оборудования, а также причин их возникновения. Эта процедура позволяет выявлять и анализировать основные причины отказов, чтобы разрабатывать эффективные меры по их предотвращению. Процедура анализа отказов горных машин включает несколько этапов.

Первым шагом процедуры анализа отказов горных машин является сбор данных. Необходимо собрать данные о техническом состоянии оборудования и обработать их для



последующего анализа. Сбор данных может включать следующие источники информации: журналы обслуживания, данные мониторинга, отчеты операторов и т. д.

Вторым шагом становится классификация отказов. Она позволяет выявить основные типы отказов и разделить их на группы. Для каждого типа отказов можно разработать соответствующие меры по предотвращению этих отказов в будущем.

После классификации отказов необходимо провести анализ причин отказов. Для этого необходимо провести тщательное исследование и установить, какие факторы привели к отказу оборудования. При этом могут использоваться различные методы, такие как метод дерева отказов, метод причинно-следственной диаграммы (диаграммы Исикавы), факторный анализ и т. д.

На основе результатов анализа причин отказов можно разработать меры по предотвращению этих отказов в будущем. Эти меры могут включать улучшение процедур обслуживания, замену деталей и компонентов, обучение персонала и т. д.

Последний шаг – оценка эффективности мер. Необходимо проанализировать эффективность принятых мер по предотвращению отказов. Это поможет определить, какие меры были наиболее эффективными, а также какие изменения необходимо внести в процедуру анализа отказов, чтобы улучшить ее.

Из вышеизложенных этапов следует, что для математической обработки полученных данных сначала необходимо их накопление и систематизация.

При проведении первого этапа – сбора данных – основными целями накопления информации об отказах являются:

- накопление материалов, необходимых для определения и уточнения значений показателей надежности;
- оценка и прогнозирование технико-экономических показателей работы машин с учетом уровня их надежности;
- изучение влияния условий и особенностей эксплуатации на надежность и выработку машин;

– разработка мероприятий по устранению конструктивных, технологических и других недостатков машин при их проектировании и изготовлении;

– накопление сведений, необходимых для установления норм расхода запасных частей, ремонтных нормативов и совершенствования системы ремонтов;

– разработка имитационных моделей эксплуатации машин для совершенствования методов их технической эксплуатации и организации работы обслуживающего персонала;

– уточнение технической документации;

– разработка справочно-информационного и программного обеспечения автоматизированного рабочего места механика (например, «АРМ механика») горного предприятия [7].

Для сбора статистической информации об отказах и фактическом техническом состоянии горных машин и оборудования на предприятиях используются различные источники и способы:

– бумажные бортовые журналы (эффективный, но уже устаревший способ ведения статистики отказов, поскольку требует выполнения дополнительных операций по переносу данных в электронный формат для последующей оперативной оценки);

– электронные таблицы (журналы) (этот способ сбора информации обладает недостаточной наглядностью и требует ручного труда по заполнению таблиц);

– специализированное программное обеспечение по типу системы SAP Plant Maintenance (SAP PM).

Система SAP PM имеет ряд модулей, которые позволяют обеспечивать управление техническими объектами и основным оборудованием, планирование технического обслуживания, управление уведомлениями о рабочих процессах и рабочими заказами в рамках управления заказами на обслуживание, сбор статистики об отказах. SAP PM¹ является очень эффективным инструментом для централизованного планирования технического обслуживания, который управляет всеми операциями по техническому обслуживанию в организации. К недостаткам применения SAP

¹ SAP PM – краткое руководство // CoderLessons.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/sap/uznaite-sap-pm/sap-pm-kratkoe-rukovodstvo> (28.04.2023).



следует отнести значительную величину затрат на приобретение данного иностранного программного обеспечения.

Модуль технического обслуживания состоит из ключевых действий, которые включают проверку, уведомления, корректирующее и профилактическое обслуживание, ремонт и другие меры по поддержанию оптимальной технической системы.

Прикладной компонент SAP PM предоставляет организации инструмент для выполнения основных технологических операций по техническому обслуживанию. Все действия, выполняемые в рамках технического обслуживания, взаимосвязаны, и поэтому этот модуль тесно интегрирован с другими модулями – планирования производства, управления материалами, продаж и т. д. Используя SAP PM, можно выполнять автоматизацию планирования ремонтных работ и упрощать работу по техническому обслуживанию и ремонту на предприятии. Система позволяет документировать существующие проблемы, планировать трудовые и материальные ресурсы, контролировать их расход с целью эффективного управления корпоративными активами.

Для выполнения технического обслуживания и ремонта система содержит следующие подмодули: управление техническими объектами, планирование задачи технического обслуживания, управление уведомлениями о рабочем процессе и заказами на выполнение работ.

Рассмотренные выше способы имеют существенный недостаток, заключающийся в слабой визуализации анализируемых данных, которая затрудняет проведение оперативного анализа технического состояния горных машин и оборудования.

Использование такого инструмента, как дашборд (*от англ.*: dashboard), для анализа отказов горных машин и оборудования может значительно упростить процесс анализа данных и повысить эффективность принимаемых решений. Дашборды – это специальные инструменты для визуализации данных, которые позволяют отображать ключевые показатели производительности, состояние оборудования, данные о производственных операциях и т. д. на одном экране. Для создания

дашборда необходимо выбрать подходящую платформу и определить ключевые показатели работы машины, которые будут отображаться на дисплее. Некоторые платформы предлагают для анализа отказов горных машин и оборудования готовые шаблоны дашбордов, которые можно настроить в соответствии с конкретными потребностями предприятия.

Дашборд может отображать множество данных, таких как:

- состояние оборудования: все показатели могут отражаться в виде графиков или диаграмм, отображающих основные показатели надежности горных машин и оборудования, количество отказов оборудования, коэффициент технического использования, фактическое техническое состояние и т. д.);

- производительность: данные о производительности можно отображать в виде графиков, диаграмм или таблиц, показывающих объемы добычи горной массы, количество отработанных моточасов и т. д.);

- расходы на обслуживание и ремонт: данные о расходах на обслуживание и ремонт могут быть отображены в виде диаграмм или таблиц, показывающих, какие затраты были сделаны на обслуживание и ремонт каждой единицы оборудования);

- данные о персонале: данные о персонале могут быть отображены на дашборде в виде графиков или таблиц, показывающих количество персонала на каждом объекте, его квалификацию и т. д.

Процедура обработки данных об отказах горных машин с применением такого инструмента, как дашборд, возможна при использовании программы Microsoft Excel. Пример подобного использования приведен ниже и включает в себя несколько этапов:

1. Импорт данных. Сначала необходимо импортировать данные об отказах горных машин и оборудования в программу Microsoft Excel. Для этого можно использовать различные форматы файлов, например CSV, TXT или XLSX.

2. Очистка и форматирование данных. После импорта данных необходимо провести их очистку и форматирование, чтобы данные были однородными и соответствовали требу-



емому формату. Это может включать удаление пустых ячеек, корректировку ошибок в данных и приведение данных к необходимому формату.

3. Создание таблицы данных. После очистки и форматирования данных необходимо создать таблицу данных, которая будет использоваться для создания дашборда. В таблице должны быть указаны ключевые параметры, такие как наименование оборудования, тип отказа, дата и время отказа и прочие параметры, которые могут быть полезны для анализа.

4. Создание графиков и диаграмм. После создания таблицы данных можно перейти к созданию графиков и диаграмм на основе этих данных. Например, можно создать график, отображающий количество отказов по дням недели, или диаграмму, показывающую распределение отказов по типу оборудования.

5. Создание дашборда. После создания графиков и диаграмм можно начать создание дашборда, который будет отображать ключевые показатели производительности и состояние оборудования. Для этого можно использовать различные инструменты Microsoft Excel, такие как графики, таблицы и диаграммы.

6. Настройка параметров дашборда. После создания дашборда необходимо настроить его параметры, такие как цвета, шрифты и размеры элементов. Также можно добавить различные функции, например фильтры и сортировки, для более удобной работы с данными.

7. Анализ данных. После создания и настройки дашборда можно приступить к анализу данных. На основе дашборда можно проводить анализ состояния оборудования, производительности и затрат на обслуживание и ремонт. Также можно использовать дашборд для прогнозирования возможных отказов и предлагать рекомендации по улучшению процессов обслуживания и ремонта.

Использование дашбордов может значительно повысить эффективность анализа данных и сократить время на принятие решений для предотвращения отказов. Учитывая ограничения дашбордов по объему обрабатываемой информации и применяемым механизмам выявления неявных закономерностей, вероятным способом обработки большого массива данных с элементами предик-

тивной аналитики могут являться нейронные сети.

Для решения этой задачи можно использовать успешные кейсы, реализованные в различных областях машиностроения, основанные на таких инструментах и библиотеках, как Python, Pandas, NumPy, Scikit-learn, TensorFlow, Keras, PySerial для считывания данных с COM-порта и т. д. [8–11].

Нейронные сети как вычислительные системы, созданные для моделирования аналитических действий при обработке больших массивов данных, позволяют осуществлять анализ и поиск взаимосвязи между большим количеством переменных. Этот инструмент может эффективно обучаться, учитывая закономерности существующих показателей в работе горных машин, и примеры использования такого способа во многих областях жизнедеятельности человека широко известны.

В машиностроении используются нейросети для диагностики неисправностей такого оборудования, как насосы, турбины и компрессоры, которое является важным компонентом во многих промышленных процессах. Эти машины подвержены различным типам неисправностей, среди которых выделяются несоосность, износ подшипников и дисбаланс. Анализ сложных и зашумленных данных о вибрации может являться невыполнимой задачей для человека, в то же время для автоматического выявления неисправностей в данных о вибрации может быть использована адаптированная обучением нейронная сеть. В качестве входных данных для нейронной сети могут использоваться данные о вибрации, а в качестве выходных – данные о вероятности неисправности машины для прогнозирования ресурса оборудования. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами обнаружения неисправностей: это быстрота, точность и возможность обнаруживать неисправности на ранней стадии, что может предотвратить катастрофические сбои и сократить время простоя в ремонте. Кроме того, нейронная сеть может учиться на собственном опыте, что означает, что со временем она может улучшить свою производительность [12–15].

В целом использование нейронных сетей в машиностроении имеет потенциал для по-



вышения точности и эффективности различных задач, таких как диагностика неисправностей, оптимизация конструкции и прогнозируемое техническое обслуживание.

Одним из примеров использования нейросетей в горнодобывающей промышленности является применение искусственных нейронных сетей для предсказания отказов горных машин и оборудования. Этот метод анализа больших объемов данных об отказах горных машин и оборудования позволяет предотвратить неожиданные отказы и снизить время простоя оборудования, что существенно влияет на эффективность работы всего производственного процесса.

Для обучения нейросети необходимо подготовить большой набор исходных данных, содержащий информацию о параметрах работы машин и оборудования, а также данные об отказах и их причинах. Данные могут быть собраны путем мониторинга работы оборудования и анализа журналов обслуживания. После подготовки набора данных искусственная нейронная сеть обучается на основе примеров и находит взаимосвязи между показателями работы машин и оборудования и вероятностью отказов. Нейросеть может предсказывать вероятность отказа на основе ранее полученных данных, текущих показателей работы машин и оборудования, данных о различных переменных, которые могут коррелировать с отказом, таких как температура, влажность или вибрация и другие, на основе изучения закономерности и взаимосвязи, которые можно использовать для прогнозирования будущих отказов [16–18].

Для успешного решения поставленной задачи по аналогии с известными решениями, описанными во многих источниках, работа программы должна состоять из следующих шагов:

- сбор и подготовка данных: сбор данных с датчиков машины и сохранение их в файле CSV, загрузка данных в Python с помощью библиотеки Pandas, очистка и предварительная обработка данных (например, удаление нулевых значений, выбросов и пропущенных данных);

- разделение данных на обучающую и тестовую выборки: обучающая выборка будет использоваться для тренировки модели, а тестовая – для проверки ее качества;

- обучение модели машинного обучения: на этапе обучения модели машинного обучения необходимо определить, какие переменные (измерения) влияют на неисправности и как они связаны друг с другом; данный шаг также подразумевает использование алгоритмов машинного обучения, таких как регрессия или классификация, для обучения модели на обучающей выборке (например, можно использовать модель линейной регрессии для предсказания показателя в будущем на основе текущих измерений датчиков);

- оценка качества модели: оценка качества модели на тестовой выборке с использованием метрики, такой как R-квадрат или среднеквадратичная ошибка;

- обработка данных: для анализа и обработки данных можно использовать различные методы, включая средства статистического анализа, машинного обучения, графического анализа и т. д.;

- использование модели для предсказания: когда модель обучена и протестирована, можно использовать ее для предсказания неисправностей на основе изменений температуры или других параметров, измеряемых датчиками на горной машине.

В целом эффективность использования нейронных сетей для прогнозирования отказов зависит от качества и количества имеющихся данных, а также от сложности изучаемой системы. Тем не менее при правильном подходе и достаточном количестве данных нейронные сети могут стать мощным инструментом для прогнозирования отказов и улучшения стратегий технического обслуживания. Таким образом, использование искусственных нейронных сетей в горнодобывающей промышленности позволит повысить эффективность работы оборудования и снизить вероятность отказов, что, в свою очередь, существенно повлияет на экономические показатели предприятия [19–21].

На основании данных об отказах основного горнотранспортного оборудования, предоставленных компанией «Полюс Вернинское», сотрудниками кафедры горных машин и электромеханических систем Иркутского национального исследовательского технического университета был произведен анализ важнейших показателей надежности работы машин.



Исходная информация содержала данные машинных отчетов о виде и моделях единиц горного оборудования, дате и времени наступления события, продолжительности ремонтного воздействия, а также описательную часть события, повлекшего остановку оборудования, с указанием причин и конкретных объектов, у которых обнаружен дефект. Исследователями был произведен анализ информации с целью выявления основных причин неисправностей горного оборудования. С учетом того, что исходные данные имеют избыточное количество информации, что, безусловно, является дополнительной проблемой для исследования, предварительно весь объем исходных данных необходимо подвергнуть фильтрации с целью удаления излишнего шума. В ряде случаев представленная информация, напротив, не имеет полноты данных для классификации и установления истинных причин отказа. Так, к примеру, информация о поломках карьерных экскаваторов за один год наблюдения имела порядка 18 % данных с неустановленными причинами поломки.

Инструмент анализа сообщений отказов журнала A2 из системы SAP позволяет оперативно выделять параметры работы машин, опираясь на разнообразные фильтры отбора, в том числе временные (за любой промежуток времени, по которому существует ведомость отказов), фильтры, основанные на наименовании класса единиц оборудования (с детализацией позиции единиц техники и их индивидуальных номеров), фильтры, указывающие

систему или характерную причину, ставшую основанием для остановки, и другие.

Использованный инструмент дашборд позволяет визуализировать отбор данных по конкретным узлам и агрегатам, описательным причинам возникновения отказов и прочим настраиваемым пользователем фильтрам с целью оценки причины отказов и продолжительности простоев для всех единиц горного оборудования предприятия. Имеется возможность вывода и сравнения информации использования оборудования за различные годы, построения линии тренда в одном информационном окне, что дает наглядную картину использования ресурса горными машинами и оборудованием.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе анализа надежности карьерных автосамосвалов компании «Полус Вернинское» был разработан дашборд, который помог оперативно оценить основные показатели надежности, а также составить перечень основных систем и узлов, в которых чаще всего происходят неисправности, с указанием их причин.

Разработанный дашборд позволяет оперативно отфильтровать информацию об интересующей единице техники и построить топ по показателю количества отказов, продолжительности простоя для конкретной модели самосвала за определенный временной промежуток (рис. 1).

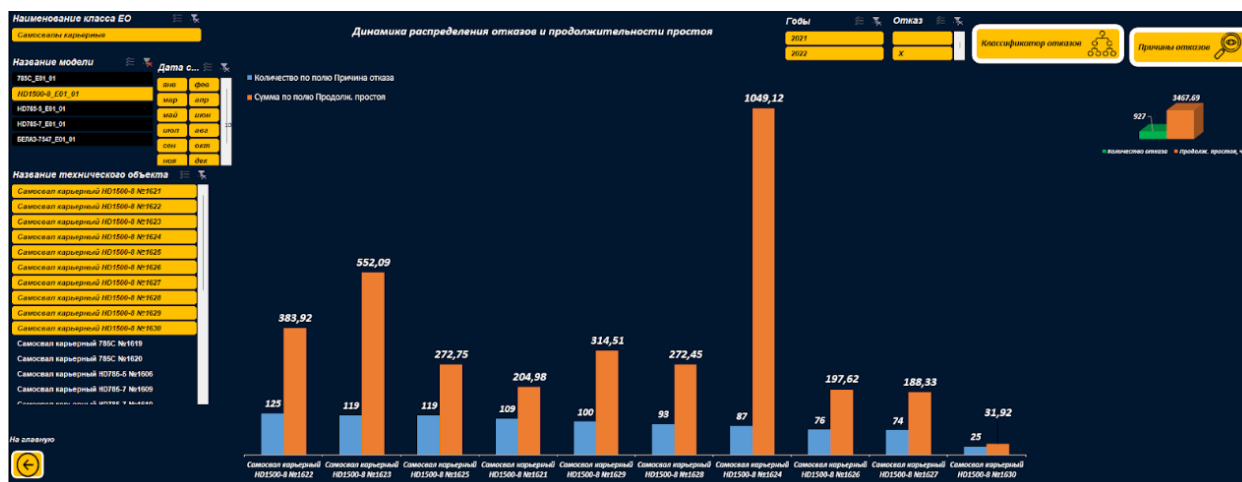


Рис. 1. Информационное окно дашборда с указанием распределения отказов по модели карьерных автосамосвалов

Fig. 1. Dashboard information window indicating failure distribution according to the mining dumper model



Также при помощи дашборда можно быстро проанализировать информацию о работе основных систем горнотранспортного оборудования, в которых наиболее часто можно ожидать возникновения неисправности (рис. 2). Судя по информации с дашборда, для карьерных автосамосвалов Komatsu HD1500-8 топ систем, в которых происходит наибольшее количество отказов, возглавляет двигатель внутреннего сгорания, топливная система и ходовая часть. Эта информация может обновляться как в табличном, так и в графическом виде и наглядно демонстрировать изменение в работе техники. При помощи заложенных в программу фильтров легко настроить такие важные показатели, как коэффициент использования оборудования во времени, продолжительность простоев, наработка на отказ, определить некоторые экономические показатели, вывести графическую информацию о единицах техники по критерию лучший / худший и т. д.

На основе информации об отказах с помощью дашборда можно помимо прочего рассчитывать показатели надежности, такие как коэффициент готовности, среднее время восстановления, наработка на отказ и др. (рис. 3), и осуществлять контроль за критическими показателями, сравнивая реальные значения

с плановыми, а также делая необходимые выводы, вносить необходимые изменения в структуру технического обслуживания и ремонта.

Проанализировав с помощью дашборда отказы автосамосвалов Komatsu HD1500-8 за промежуток в два года, можно сделать следующие заключения:

- основными системами, в которых встречаются неисправности, являются: ДВС – 17 %, топливная система – 16 %, ходовая часть – 14 %, электрооборудование – 11 %;

- основными причинами отказа являются организационные причины, которые составляют 51 % от общего числа причин (рис. 4);

- динамика распределения отказов и продолжительности простоя (рис. 5) наглядно иллюстрирует, что пик отказов и продолжительности простоя приходится на летний период с июня по сентябрь.

Использование такого инструмента, как дашборд, дает возможность и руководителям, и сотрудникам инженерного звена, занимающимся эксплуатацией оборудования, наблюдать в режиме реального времени за основными характеристиками работы горнотранспортного оборудования с целью управления плановыми показателями. С помощью этого инструмента легко перейти к определению и оценке наиболее подверженных неисправно-



Рис. 2. Информационное окно дашборда с указанием распределения отказов по системам карьерных автосамосвалов HD1500-8

Fig. 2. Dashboard information window indicating failure distribution according to the HD1500-8 mining dumper systems

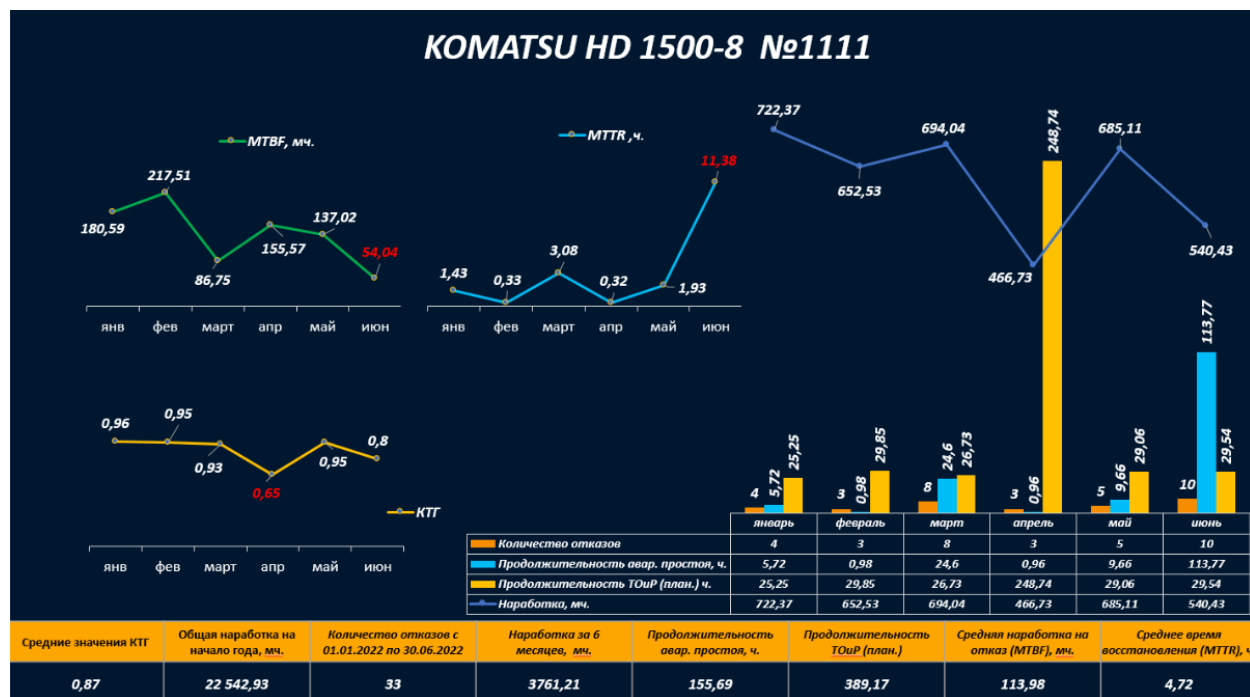


Рис. 3. Информационное окно дашборда с показателями надежности конкретного карьерного автосамосвала HD1500-8
Fig. 3. Dashboard information window indicating reliability indicators of a specific HD1500-8 mining dumper

стям узлов горных машин и оборудования и более детально разобраться в коренных причинах возникновения неисправностей.

Учитывая большой объем исходных данных и возможность их визуализации, появляется перспектива создания модели системы оценки карты дефектов, которая в итоге должна повлиять на изменение стратегии обслуживания горного оборудования с целью снижения стоимости ремонтов и рационального обоснования количества запасных частей. Исходя из накопленной информации, авторам статьи видится дальнейшая перспектива в использовании исходных данных совместно или посредством обработки их массива нейронными сетями с целью возможной предиктивной аналитики с выходом на прогнозирование вероятных отказов элементов горных машин. Существует возможность обработки данных с помощью алгоритмов машинного обучения для предсказания неисправностей на основе показаний контрольных датчиков, установленных непосредственно на горной машине [22–24].

Заключение

Повышение показателей надежности горнодобывающих машин является одной из ос-

новных проблем для компаний, работающих в этой отрасли. Важнейшей частью обеспечения эффективности работы горных машин и оборудования является возможность точного анализа любых потенциальных отказов и их отслеживание во времени. Для этого предприятия должны использовать адаптивные инструменты обработки и анализа данных. В последние годы наблюдается значительное развитие технологии приборных панелей, таких как дашборд, которая помогает горнодобывающим компаниям проводить именно подобный анализ. С помощью приборных панелей сотрудникам стало как никогда легко отслеживать различные аспекты, связанные с отказами оборудования, такие как типы отказов, частота их появления, принадлежность вышедшего из строя узла к той или иной системе машины, а также другую информацию, имеющую отношение к работе оборудования. Все эти данные можно фильтровать и сортировать, чтобы сотрудники, эксплуатирующие горную технику, могли быстро выявить закономерности или определить, какие узлы и системы машины требуют пристального внимания или оперативного вмешательства. Дашборды также предоставляют подробную статистическую информацию о работе оборудо-

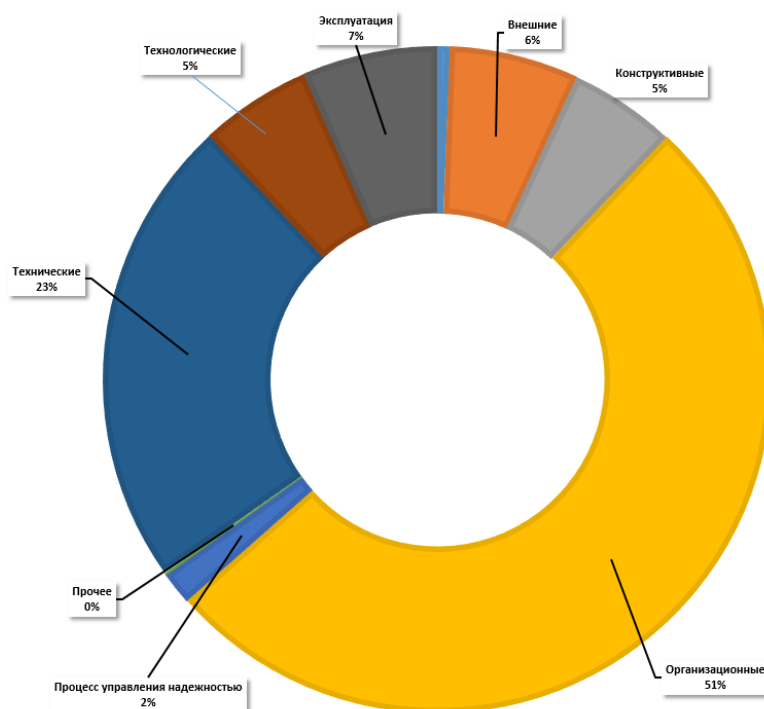


Рис. 4. Распределение отказов по причинам их возникновения
Fig. 4. Failure distribution by their occurrence causes

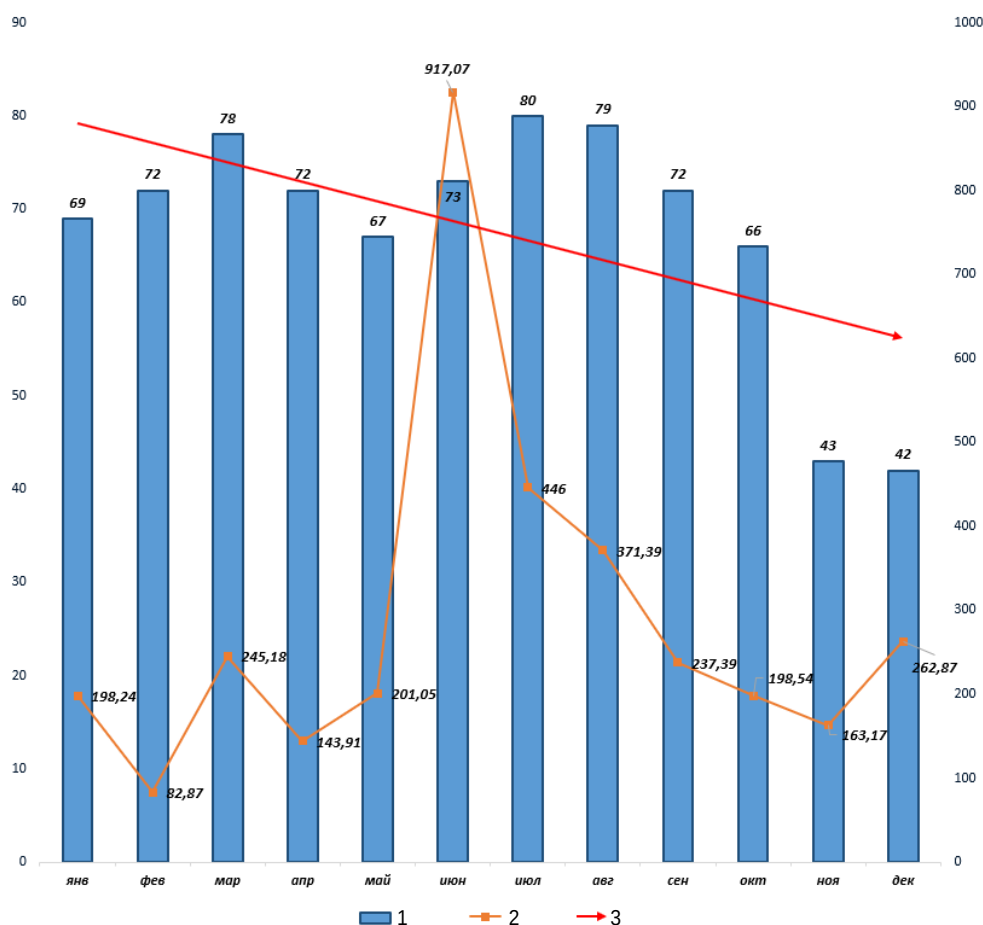


Рис. 5. Динамика распределения отказов по месяцам:
1 – количество отказов; 2 – продолжительность простоя, ч; 3 – тренд количества отказов
Fig. 5. Failure distribution dynamics by months:
1 – number of failures; 2 – idle time, hr; 3 – failure number trend



вания, отражая ключевые показатели эффективности: среднее время между отказами, среднее время восстановления и т. д. Эта информация может быть использована предприятиями при принятии решений об инвестициях в новое оборудование, модернизацию существующего оборудования или о корректировке графиков ремонта и технического обслуживания эксплуатируемых горных машин.

Кроме того, использование приборных панелей значительно облегчает визуализацию тенденций и наблюдение за их изменением во времени. Также оно позволяет компаниям получить доступ ко всей необходимой информации, даже если они не обладают специфическими техническими знаниями, поскольку все операции происходят в самом интерфейсе приборной панели, что значительно упрощает

доступ по сравнению с традиционными методами, такими как электронные таблицы, которые требуют от пользователей определенных навыков, например владения техникой работы с электронными таблицами, понимания сложных формул и т. д. [25, 26]. Это упрощение означает, что даже небольшие компании, не владеющие специализированными отделами, теперь имеют доступ к инструментам анализа, использование которых ранее было доступно только при помощи аутсорсинговых услуг, дорогостоящих программных пакетов, требующих значительных технических знаний, и т. д. В результате не только экономятся деньги, но и повышается общая эффективность организаций, что означает возможные выгоды как с операционной точки зрения, так и с точки зрения экономии средств и т. д.

Список источников

1. Odeyar P., Apel D.B., Hall R., Zon B., Skrzypkowski K. A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 17. P. 6263. <https://doi.org/10.3390/en15176263>.
2. Махно Д.Е., Шадрин А.И. Управление ресурсами технической эксплуатации горного оборудования // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2005. № 2. С. 68–71. <https://elibrary.ru/jxhoeor>.
3. Храмовских В.А. Оценка ресурса базовых узлов металлоконструкций карьерных экскаваторов на основе обработки статистической информации // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2005. № 1. С. 167. <https://elibrary.ru/jxklbf>.
4. Zheng S., Cheng K., Wang J., Liao Q., Liu X., Liu W. Failure analysis of frame crack on a wide-body mining dump truck // *Engineering Failure Analysis*. 2015. Vol. 48. P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.013>.
5. Benjumea D.C., Laniado H., Combata O. Analytical model to monitor the oil conditions on the main components of mining dumpers // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 17. P. 100934. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100934>.
6. Petrović D.V., Tanasijević M., Stojadinović S., Ivaz J., Stojković P. Fuzzy expert analysis of the severity of mining machinery failure // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 94. P. 106459. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106459>.
7. Непомнящих К.А. Методика оценки надежности горных машин на эксплуатационной стадии жизненного цикла // *Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования: сб. науч. тр. по материалам XXIX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Анапа, 30 мая 2022 г.)*. Анапа: Изд-во ООО «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2022. С. 142–150. <https://elibrary.ru/ngpmef>.
8. Awan M.B., Li K., Li Z., Ma Z. A data driven performance assessment strategy for centralized chiller systems using data mining techniques and domain knowledge // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 41. P. 102751. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102751>.
9. Arjun S., Murthy L.R.D., Biswas P. Interactive sensor dashboard for smart manufacturing // *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 200. P. 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.204>.
10. Dogan A., Birant D., Machine learning and data mining in manufacturing // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 166. P. 114060. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114060>.
11. Lu Y.-J., Lee W.-C., Wang C.-H. Using data mining technology to explore causes of inaccurate reliability data and suggestions for maintenance management // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023. Vol. 83. P. 105063. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105063>.
12. Alamdari S., Basiri M.H., Mousavi A., Soofastaei A. Application of machine learning techniques to predict haul truck fuel consumption in open-pit mines // *Journal of Mining and Environment*. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 69–85. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11577.2145>.
13. Singh K., Maiti J., A novel data mining approach for analysis of accident paths and performance assessment of risk control systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 202. P. 107041. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107041>.
14. Wang Z., Xia H., Zhang J., Yang B., Yin W. Imbalanced sample fault diagnosis method for rotating machinery in nuclear power plants based on deep convolutional conditional generative adversarial network // *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. Vol. 55. Iss. 6. P. 2096–2106. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.036>.
15. Szymahski Z., Paraszczak J. Application of artificial intelligence methods in diagnostics of mining machinery // *IFAC Proceedings Volumes*. 2007. Vol. 40. Iss. 11. P. 403–408. <https://doi.org/10.3182/20070821-3-CA-2919-00057>.



16. Gölbaşı O., Demirel N. A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: an application to mining equipment // *Computers & Industrial Engineering*. 2017. Vol. 113. P. 525–540. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.002>.

17. Liu Z., Zuo M.J., Jin Y., Pan D., Qin Y. Improved local mean decomposition for modulation information mining and its application to machinery fault diagnosis // *Journal of Sound and Vibration*. 2017. Vol. 397. P. 266–281. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.02.055>.

18. Lazakis I., Raptodimos Y., Varelas T. Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks // *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 152. P. 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017>.

19. Равин А.А., Хруцкий О.В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2018. № 1. С. 33–47. <https://elibrary.ru/yoqfau>, <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-1-33-47>.

20. Черепанов А.П. Анализ преимуществ и недостатков современных методов прогнозирования ресурса технических устройств // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2019. № 13. С. 90–101. <https://elibrary.ru/amcxvn>, <https://doi.org/10.36629/2686-777x-2019-1-13-90-101>.

21. Черепанов А.П. Методы прогнозирования ресурса единичных и уникальных машин // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2022. № 16. С. 153–164. <https://elibrary.ru/eyvjgm>.

22. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Огреничев А.В.,

Азаров Н.В. Оценка прогнозирования ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // *Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. (с. Дивноморское, 2–5 октября 2019 г.)*. Дивноморское: Изд-во ДГТУ, 2019. С. 164–170. <https://elibrary.ru/IFGEUQ>.

23. Дзуганов В.Б., Анхудов Т.М., Болотоков А.Л., Губжиков Х.Л. Совершенствование методики прогнозирования распределения ресурса машин и их элементов // *Научная жизнь*. 2022. Т. 17. № 5. С. 793–804. <https://elibrary.ru/vzioft>, <https://doi.org/10.35679/1991-9476-2022-17-5-793-804>.

24. Гусев А.С., Стародубцева С.А., Щербаков В.И. Вероятностное прогнозирование долговечности и остаточного ресурса элементов конструкций // *Вестник машиностроения*. 2020. № 3. С. 39–40. <https://elibrary.ru/djwqnu>, <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-3-39-40>.

25. Сай В.К., Щербаков М.В. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2019. № 1. С. 33–44. <https://elibrary.ru/pzxhsl>.

26. Криков А.М., Федоров А.Г., Сидоренко М.Н. Совершенствование прогнозирования остаточного ресурса параметров узлов и агрегатов грузовых автомобилей // *Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация: материалы II Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Чита, 30–31 октября 2018 г.)*. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2018. С. 191–195. <https://elibrary.ru/zjgggv>.

References

1. Odeyar P., Apel D.B., Hall R., Zon B., Skrzypkowski K. A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining. *Energies*. 2022;15(17):6263. <https://doi.org/10.3390/en15176263>.

2. Makhno D.E., Shadrin A.I. Resource management of mining equipment technical operation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2005;2:68-71. (In Russ.). <https://elibrary.ru/jxoeop>.

3. Khramovskikh V.A. Estimating operation life of basic units of opencast excavator metal structures based on statistical information processing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2005;1:167. (In Russ.). <https://elibrary.ru/jxklbf>.

4. Zheng S., Cheng K., Wang J., Liao Q., Liu X., Liu W. Failure analysis of frame crack on a wide-body mining dump truck. *Engineering Failure Analysis*. 2015;48:153-165. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.013>.

5. Benjumea D.C., Laniado H., Combita O. Analytical model to monitor the oil conditions on the main components of mining dumpers. *Results in Engineering*. 2023;17:100934. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100934>.

6. Petrović D.V., Tanasijević M., Stojadinović S., Ivaz J., Stojković P. Fuzzy expert analysis of the severity of mining machinery failure. *Applied Soft Computing*. 2020;94:

106459. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106459>.

7. Nepomnyashchikh K.A. Assessment methodology of mining machine reliability at the operational stage of the life cycle. In: *Prioritety mirovoi nauki: novye podkhody i aktual'nye issledovaniya: sb. nauch. tr. po materialam XXIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Priorities of world science: new approaches and current research: collected scientific articles based on the materials of the 29th International scientific and practical conference*. 30 May 2022, Anapa. Anapa: LLC "Research Center for Economic and Social Processes" in the Southern Federal District; 2022, p. 142–150. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ngpmef>.

8. Awan M.B., Li K., Li Z., Ma Z. A data driven performance assessment strategy for centralized chiller systems using data mining techniques and domain knowledge. *Journal of Building Engineering*. 2021;41:102751. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102751>.

9. Arjun S., Murthy L.R.D., Biswas P. Interactive sensor dashboard for smart manufacturing. *Procedia Computer Science*. 2022;200:49-61. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.204>.

10. Dogan A., Birant D., Machine learning and data mining in manufacturing. *Expert Systems with Applications*. 2021;166:114060. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114060>.

11. Lu Y.-J., Lee W.-C., Wang C.-H. Using data mining technology to explore causes of inaccurate reliability data



and suggestions for maintenance management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023;83:105063. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105063>.

12. Alamdari S., Basiri M.H., Mousavi A., Soofastaei A. Application of machine learning techniques to predict haul truck fuel consumption in open-pit mines. *Journal of Mining and Environment*. 2022;13(1):69-85. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11577.2145>.

13. Singh K., Maiti J., A novel data mining approach for analysis of accident paths and performance assessment of risk control systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;202:107041. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107041>.

14. Wang Z., Xia H., Zhang J., Yang B., Yin W. Imbalanced sample fault diagnosis method for rotating machinery in nuclear power plants based on deep convolutional conditional generative adversarial network. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023;55(6):2096-2106. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.036>.

15. Szymahski Z., Paraszczak J. Application of artificial intelligence methods in diagnostics of mining machinery. *IFAC Proceedings Volumes*. 2007;40(11):403-408. <https://doi.org/10.3182/20070821-3-CA-2919.00057>.

16. Gölbaşı O., Demirel N. A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: an application to mining equipment. *Computers & Industrial Engineering*. 2017;113:525-540. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.002>.

17. Liu Z., Zuo M.J., Jin Y., Pan D., Qin Y. Improved local mean decomposition for modulation information mining and its application to machinery fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*. 2017;397:266-281. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.02.055>.

18. Lazakis I., Raptodimos Y., Varelas T. Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*. 2018;152:404-415. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017>.

19. Ravin A.A., Khrutsky O.V. Engineering methods for predicting the residual resource of the equipment. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2018;1:33-47. (In Russ.). <https://elibrary.ru/yoqfau>, <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-1-33-47>.

20. Cherepanov A.P. Analysis of advantages and disadvantages of modern methods forecasting the resource of technical devices. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo*

tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Angarsk State Technical University. 2019;13:90-101. (In Russ.). <https://elibrary.ru/amcxvn>, <https://doi.org/10.36629/2686-777x-2019-1-13-90-101>.

21. Cherepanov A.P. Of forecasting the resource of single and unique machines. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2022;16:153-164. (In Russ.). <https://elibrary.ru/eyvjgm>.

22. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Ogrenichev A.V., Azarov N.V. Assessment of cable line resource forecasting using the method of artificial neural networks. In: *Fundamental'nye osnovy fiziki, khimii i dinamiki naukoemkikh tekhnologicheskikh sistem formobrazovaniya i sborki izdelii: sb. tr. nauch. simpoziuma tekhnologov-mashinostrotelei = Fundamental foundations of physics, chemistry and dynamics of science-intensive technological systems for product shaping and assembling: collection of papers of the scientific symposium of mechanical engineering technologists*. 2–5 October 2019, Divnomorskoe. Divnomorskoe: Don State Technical University; 2019, p. 164–170. (In Russ.). <https://elibrary.ru/IFGEUQ>.

23. Dzuganov V.B., Apkhudov T.M., Bolotkov A.L., Gubzhokov Kh.L. Improvement of the method for forecasting the resource distribution of machines and their elements. *Nauchnaya zhizn'*. 2022;17(5):793-804. (In Russ.). <https://elibrary.ru/vzioft>, <https://doi.org/10.35679/1991-9476-2022-17-5-793-804>.

24. Gusev A.S., Starodubtseva S.A., Shcherbakov V.I. Probabilistic forecasting of durability and residual life of structural elements. *Vestnik mashinostroeniya*. 2020;3:39-40. (In Russ.). <https://elibrary.ru/djwqnu>, <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-3-39-40>.

25. Sai V.K., Shcherbakov M.V. A data-driven method for remaining useful life prediction of multiple-component systems. *Prikladnyy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2019;1:33-44. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pzxhsl>.

26. Krikov A.M., Fedorov A.G., Sidorenko M.N. Improvement of residual life forecasting of truck unit and assembly parameters. In: *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie sredstva: proektirovanie, proizvodstvo, ekspluatatsiya: materialy II Vseross. nauch.-prakt. konf. = Ground transport and technological means: design, manufacturing, operation: proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference*. 30–31 October 2018, Chita. Chita: Transbaikal State University; 2018, p. 191–195. (In Russ.). <https://elibrary.ru/zjgggv>.

Информация об авторах / Information about the authors



Храмовских Виталий Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ wax@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-0590-0393>



Vitaliy A. Khramovskikh,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ wax@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-0590-0393>



Шевченко Алексей Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
директор Института недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
shan@istu.edu
Aleksey N. Shevchenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Director of the Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
shan@istu.edu



Непомнящих Кирилл Андреевич,
аспирант,
ассистент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
nka@istu.edu
Kirill A. Nepomnyashchikh,
Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
nka@istu.edu

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.05.2023; одобрена после рецензирования 31.05.2023; принята к публикации 15.06.2023.

The article was submitted 19.05.2023; approved after reviewing 31.05.2023; accepted for publication 15.06.2023.



Научная статья

УДК 552.578.2+519.677+004.032.26

<https://elibrary.ru/pjemfo><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-226-233>

Прогнозирование аварий на погружном насосном оборудовании с использованием методов искусственного интеллекта

Э.В. Шакирова^а, М.В. Семькин^б^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^бТюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Резюме. Как известно, в процессе работы электрических погружных насосов собираются и обрабатываются большие объемы данных. Для оптимизации работы операторов центра управления разработкой рекомендуется использовать автоматизированную систему предупреждения осложнений. Так операторам удастся своевременно получать информацию о возможных сбоях в работе оборудования, что, в свою очередь, позволит увеличить срок службы данного оборудования и снизить операционные затраты на ремонт. Целью представленного исследования являлась разработка модели для прогнозирования аварий на погружном насосном оборудовании с использованием методов искусственного интеллекта. Для выявления наиболее точной модели в данной работе приведено сравнение следующих методов прогнозирования: метода ближайших соседей и метода построения линейного классификатора. Представленная корреляция создана на основе 30 параметров с 272 скважин месторождения Восточной Сибири. Ее использование позволило без ошибок спрогнозировать сбой и осложнения в работе насосного оборудования в зависимости от газового фактора и частоты. Таким образом, разработанная модель может быть использована предприятиями нефтегазодобывающей отрасли для прогнозирования сбоев и аварий в работе погружного насосного оборудования. Проведенное исследование показывает, что точность прогнозирования искомого параметра в разработанной модели искусственного интеллекта превосходит результаты обычных статистических методов. Также модель может быть полезна в перспективе оптимизации процессов при планировании и разработке месторождений. Искусственный интеллект является наилучшим методом прогнозирования аварий на погружном оборудовании, благодаря высокой скорости и точности когнитивные технологии широко применяются в обработке больших данных.

Ключевые слова: погружное насосное оборудование, искусственный интеллект, прогнозирование, коэффициент корреляции, средняя абсолютная ошибка

Для цитирования: Шакирова Э.В., Семькин М.В. Прогнозирование аварий на погружном насосном оборудовании с использованием методов искусственного интеллекта // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 226–233. <https://elibrary.ru/pjemfo>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-226-233>.

Original article

Submersible pumpset failure prediction using artificial intelligence methods

Elvira V. Shakirova^а, Mikhail V. Semykin^б^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^бUniversity of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. It is well-known that large amounts of data are collected and processed during the operation of electric submersible pumps. To optimize the work of mining control center operators, it is recommended to use an automated emergency prevention system. In this way, operators will be able to receive timely information about possible equipment failures, which in its turn will increase the service life of the equipment and reduce operating costs for repairs. The purpose of the present research is to develop a model predicting submersible pumping equipment failures using the method of artificial intelligence. To identify the most accurate model, the paper compares the following forecasting methods: the nearest neighbour



method and the linear classifier building method. The presented correlation was created on the basis of 30 parameters obtained from 272 wells of the Eastern Siberia field. Being used, it enabled error-free prediction of failures and complications in pumping equipment operation depending on the gas factor and frequency. Thus, the developed model can be used by oil and gas enterprises to predict failures and accidents in the operation of submersible pumping equipment. The conducted study shows that the prediction accuracy of the required parameter in the developed artificial intelligence model exceeds the results of conventional statistical methods. The model also can be useful for future optimization of processes when field planning and developing. Artificial intelligence is the best prediction method of submersible pumping equipment failures, due to its high speed and accuracy, cognitive technologies are widely used in big data processing.

Keywords: submersible pumpset, artificial intelligence, prediction, correlation coefficient, mean absolute error

For citation: Shakirova E.V., Semykin M.V. Submersible pumpset failure prediction using artificial intelligence methods. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):226-233. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pjemfo>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-226-233>.

Введение

В настоящее время одной из приоритетных задач, стоящих перед нефтегазодобывающими компаниями, является повышение эффективности операционной деятельности. Для достижения данной цели, в свою очередь, необходимо оптимизировать все процессы, протекающие в компании. Наиболее результативным методом оптимизации является применение искусственного интеллекта [1].

Искусственный интеллект – это способность имитации человеческого интеллекта при помощи компьютерных систем. Данный метод позволяет выполнять следующие задачи:

- обучение, обработка информации;
- применение изученной информации для принятия определенных решений;
- исправление встречающихся в работе ошибок, самокоррекция.

Наиболее капиталоемкой статьей расходов в нефтегазодобыче является этап строительства скважин: на него приходится порядка 40 % всех привлеченных инвестиций [2, 3]. При совершенствовании технологий сбора и обработки больших данных, содержащих информацию о жизненном цикле скважин, могут быть разработаны системы предупреждения и предотвращения возможных аварий. Данные системы позволяют выявить определенные закономерности и степень их влияния при помощи технологий искусственного интеллекта [4]. Так, например, в процессе работы электрических погружных насосов используются как внутрискважинные, так и поверхностные каналы для передачи данных в локальный центр управления разработкой месторождения. В зависимости от типа используемых скважинных датчиков можно отсле-

дить следующие параметры: давление и температуру на приеме насоса, температуру обмотки погружного электродвигателя, температуру моторного масла и величину осевых вибраций [5]. Помимо этого, данная система в режиме реального времени позволит проводить мониторинг следующих параметров на устье скважины: поверхностный расход, давление в трубопроводе, давление в обсадной колонне, частоту, удельное сопротивление кабеля и фазное напряжение [6, 7].

Таким образом, в случае использования автоматизированной системы предупреждения осложнений предприятию удастся заблаговременно учесть возможные сбои в работе оборудования, тем самым увеличить срок службы данного оборудования и снизить эксплуатационные расходы на ремонт [8, 9].

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных для анализа были использованы промысловые данные с одного из месторождений Восточной Сибири: технология добычи и параметры работы электроцентробежного насоса, текущие параметры разработки, PVT-свойства и энергопотребление (табл. 1). Перед началом работы необходимо подготовить исходную выборку. Для этого требуется проверить данные на наличие аномальных значений или же на несоответствия типам данных, а также при необходимости удалить строки с недостающими данными [10]. В дальнейшем данную выборку необходимо поделить на тренировочную, по которой будут определяться зависимости и прогнозироваться показатели, и тестовую, по которой будет осуществляться проверка натренированной модели [11].



Таблица 1. Данные с месторождения Восточной Сибири
Table 1. Data from the Eastern Siberia field

Скважина	Параметры работы электроцентробежного насоса				...	Состояние
	Номинальный напор, м	Количество ступеней электроцентробежного насоса	Частота, Гц	Мощность погружного электродвигателя, кВт	...	
X ₁	2050	334	55	56	...	В работе
X ₂	1850	329	55	45	...	В работе
X ₃	1850	334	40	32	...	В работе
X ₄	1500	347	57	56	...	В работе
X ₅	1800	326	40	32	...	В работе
X ₆	2204	470	46,5	45	...	в работе
X ₇	2204	470	45,7	45	...	В работе
X ₈	1960	308	53	45	...	Остановлена
...	...	...	...	...	...	...
X ₂₇₂	1500	290	57	32	...	В работе

Согласно исходной выборке, средний показатель обводненности скважинной продукции составляет 23,5 %, при этом минимальное и максимальное значения равны 0 и 93 % соответственно. В свою очередь, среднее содержание механических примесей составляет 140,3 мг/л с минимальным значением 16 мг/л и максимальным значением 758 мг/л.

После того, как выборка была подготовлена, необходимо провести селекцию признаков таблицы с помощью метода ExtraTreesClassifier и установить столбцы с наиболее выраженными связями [12, 13]. В данном случае таковыми оказались признаки «Газовый фактор» и «Частота» (табл. 2).

Далее необходимо натренировать модели искусственного интеллекта. Для этого всю выборку нужно разделить на две равные части по 136 строк в каждой [14]. Искомый парамет-

ром, который будет сопоставляться с прогнозными показателями, является столбец «Состояние». Именно по данному критерию будет проведено сравнение показателей натренированной модели. В качестве классификации категориального признака «Состояние» воспользуемся двумя методами: методом ближайших соседей (*англ.*: *k*-nearest neighbors algorithm, *k*-NN) и методом построения линейного классификатора.

Первый метод включает в себя оценивание сходств объектов, то есть объект принадлежит к тому классу, к которому относятся ближайшие к нему объекты тренировочной выборки. Данный метод опирается на гипотезу компактности, которая гласит, что если степень сходства объектов введена удовлетворительно, то схожие объекты преобладающим образом лежат в одном классе. В таком

Таблица 2. Данные, полученные в ходе селекции признаков
Table 2. Data obtained from characteristic selection

Признак	Степень влияния
Состояние	0,64863
Газовый фактор	0,078427
Частота	0,028361
Дебит жидкости	0,018052
Содержание мехпримесей	0,015006
Коэффициент подачи насоса	0,014784
Вязкость воды в пластовых условиях	0,01346
Буферное давление	0,011049
Давление в линии	0,010935



случае граница между классами характеризуется простой формой, а сами классы образуют компактно локализованные области в пространстве объектов. Данный метод настраиваемый: за количество принимаемых ближайших соседей можно взять любое число $k \geq 1$.

Второй метод основан на построении линейной разделяющей поверхности. При наличии двух классов разделяющей поверхностью является гиперплоскость, которая и делит все признаки на два полупространства.

Для проверки качества работы искусственного интеллекта необходимо применить метод crosstab библиотеки Pandas [3, 7, 15, 16]. Данный метод выводит матрицу ошибок, на которой наглядно видно количество случаев верного или же неверного определения аварий [4, 5, 17, 18]. Искусственный интеллект сработал отлично, если он правильно соотнес все скважины тестовой выборки: 5 позиций «остановлена» и 131 позицию «в работе».

Результаты исследования

Проверка метода ближайших соседей на тестовой модели показала, что данный метод позволяет идеально отобразить все позиции «остановлена» и «в работе» при количестве ближайших соседей $k = 1$ (рис. 1).

При увеличении параметра k качество работы искусственного интеллекта падает, что говорит о низкой эффективности используемого метода. Так, например, при $k = 3$ искусственный интеллект определил только 3 позиции «остановлена» вместо заданных 5 (рис. 2).

Метод построения линейного классификатора показал меньшую точность в сравнении с предыдущим методом [7]. Так, искусственный интеллект определил 5 позиций «остановлена», но они не совпадают с действительными скважинами из исходных данных (рис. 3). Данный метод не удовлетворяет условиям подбора ввиду низкой эффективности [19, 20].

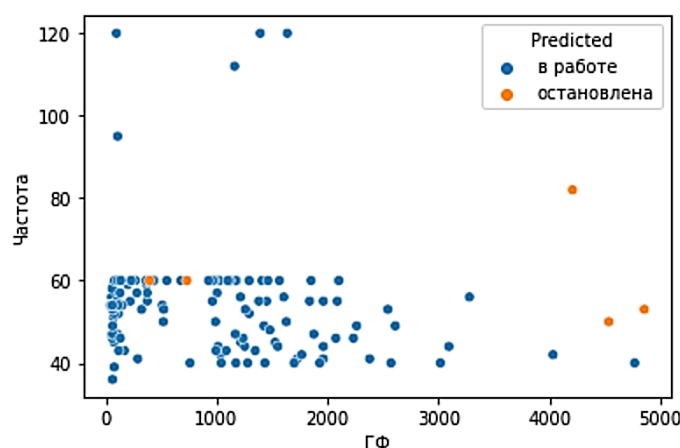


Рис. 1. Результаты обучения модели методом ближайших соседей при $k = 1$
Fig. 1. Results of model training by the nearest neighbor method when $k = 1$

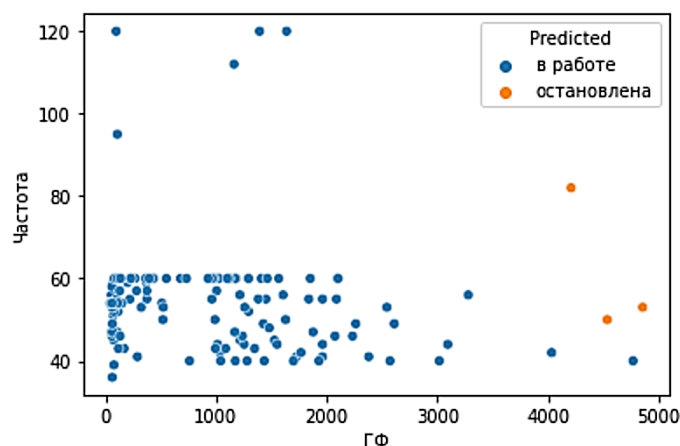


Рис. 2. Результаты обучения модели методом ближайших соседей при $k = 3$
Fig. 2. Results of model training by the nearest neighbor method when $k = 3$

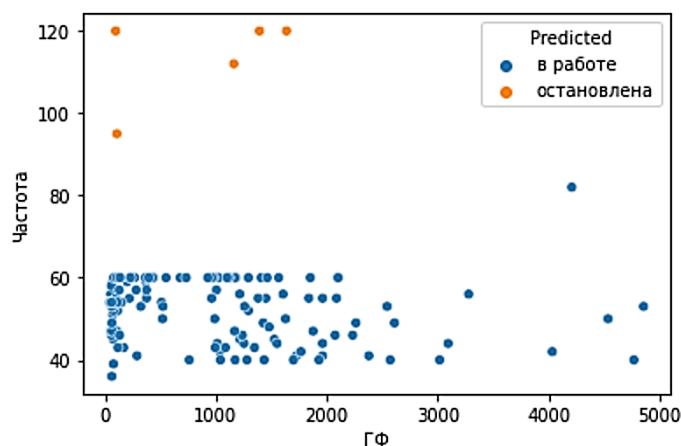


Рис. 3. Результаты обучения модели методом построения линейного классификатора
Fig. 3. Results of model training by the linear classifier building method

В ходе исследования было выявлено, что метод ближайших соседей при $k = 1$ смог предсказать остановку скважины в 100 % случаев [17]. Второй же метод не смог предсказать остановки скважин и принял 5 работающих скважин за остановленные (рис. 4).

Обсуждение полученных результатов

В ходе селекции признаков методом ExtraTreesClassifier были определены ключевые влияющие параметры: газовый фактор и частота. Именно на данных параметрах и базируется определение состояния работы погружного насосного оборудования. Разработанная корреляция искусственного интеллекта, базирующаяся на методе ближайших соседей, показала высокую эффективность при работе с тестовой выборкой. В дальнейшем применение такой корреляции на производственных объектах позволит заблаговременно определять сбои и аварии в работе скважины, тем самым увеличивать межремонтный период, а также срок службы исполь-

зуемого оборудования, что, в свою очередь, приведет к снижению эксплуатационных расходов на ремонт.

Заключение

Таким образом, при полномасштабном введении технологий искусственного интеллекта могут быть достигнуты все стоящие перед нефтегазодобывающими компаниями задачи, связанные с повышением эффективности производственных процессов. В то же время использование данных технологий позволит повысить уровень управления процессами по нефте- и газодобыче одновременно со снижением уровня влияния человеческого фактора.

В ходе проведенного исследования была разработана модель искусственного интеллекта для прогнозирования аварий как функции, зависящей от газового фактора и частоты. На основании полученных в ходе работы данных можно сделать следующие выводы:

1. Метод ближайших соседей является наиболее точной моделью искусственного интел-

Состояние в работе остановлена			Состояние в работе остановлена		
Predicted			Predicted		
в работе	131	0	в работе	126	5
остановлена	0	5	остановлена	5	0
a			b		

Рис. 4. Матрица ошибок:
a – метода ближайших соседей; b – метода построения линейного классификатора

Fig. 4. Error matrix:
a – the nearest neighbour method; b – the linear classifier building method



кта, которая способна предсказать сбои и осложнения в работе оборудования без ошибок.

2. Метод построения линейного классификатора в данном случае обладает меньшей эффективностью и не может в полной мере удовлетворить условиям подбора.

3. Разработанная модель может быть ис-

пользована на производстве для прогнозирования аварий в работе погружного насосного оборудования с высоким показателем точности. Для увеличения данного показателя необходимо дополнить тренировочную модель остальными промысловыми показателями и оценить степень их влияния.

Список источников

1. Черников А.Д., Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сбоев А.Г., Семенова-Чашина О.К., Фицнер Л.К. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 3. С. 87–96. <https://elibrary.ru/ornybd>, <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>.
2. Дмитриевский А.Н., Дуплякин В.О., Еремин Н.А., Капранов В.В. Алгоритм создания нейросетевой модели для классификации в системах предупреждения осложнений и аварийных ситуаций при строительстве нефтяных и газовых скважин // Датчики и системы. 2019. № 12. С. 3–10. <https://elibrary.ru/nkrfen>, <https://doi.org/10.25728/datsys.2019.12.1>.
3. Hinton G.E., Osindero S., Teh Y.-W. A fast learning algorithm for deep belief nets // Neural Computation. 2006. Vol. 18. Iss. 7. P. 1527–1554. <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>.
4. Tahmasebi P., Hezarkhani A. Hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation // Computers & Geosciences. 2012. Vol. 42. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.004>.
5. Kaydani H., Mohebbi A., Baghaie A. Neural fuzzy system development for the prediction of permeability from wireline data based on fuzzy clustering // Petroleum Science and Technology. 2012. Vol. 30. Iss. 19. P. 2036–2045. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.531345>.
6. Шакирова Э.В., Семькин М.В., Александров А.А., Брыжеватых Н.В. Современные методы по подбору деэмульгаторов при обезвоживании нефтей Восточной Сибири // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 3. С. 36–44. <https://elibrary.ru/ridjiu>, <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-3-36-44>.
7. Ben-Hur A., Horn D., Siegelmann H.T., Vapnik V. Support vector clustering // Journal of Machine Learning Research. 2001. Vol. 2. P. 125–137. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.5187>.
8. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical recipes: the art of scientific computing. New York: Cambridge University Press, 2007. 1235 p.
9. Шакирова Э.В., Александров А.А., Семькин М.В. Разработка новой эмпирической корреляции для прогнозирования объемного коэффициента пластовой нефти с использованием методов искусственного интеллекта // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 408–416. <https://elibrary.ru/vrenyh>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-408-416>.
10. Trontl K., Šmuc T., Pevec D. Support vector regression model for the estimation of γ-ray buildup factors for multi-layer shields // Annals of Nuclear Energy. 2007. Vol. 34. Iss. 12. P. 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.05.001>.
11. Gholami R., Shahraki A.R., Jamali Paghaleh M. Prediction of hydrocarbon reservoirs permeability using support vector machine // Mathematical Problems in Engineering. 2012. P. 670723. <https://doi.org/10.1155/2012/670723>.
12. Averkina E.V., Shakirova E.V. Specifics of drilling wells in the abnormally-high-pressure rock beds in the oil-and-gas fields of Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 229. P. 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012032>.
13. Белозерова О.В., Коваленко В.В., Шакирова Э.В. Исследование состава и свойств нефти Ичѣдинского месторождения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т.10. № 3. С. 522–528. <https://elibrary.ru/yzjzxy>, <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-522-528>.
14. Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Николаева М.Б., Климова А.А. Сравнительный анализ реагентов-ингибиторов набухания глинистых отложений, применяемых на месторождениях Восточной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 12. С. 138–145. <https://elibrary.ru/teeamu>, <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2947>.
15. Lippmann R.P. An introduction to computing with neural nets // IEEE ASSP Magazine. 1987. Vol. 4. Iss. 2. P. 4–22.
16. Rammay M.H., Abdullaheem A. Automated history matching using combination of adaptive neuro fuzzy system (ANFIS) and differential evolution algorithm // SPE Large scale computing and big data challenges in Reservoir simulation conference and exhibition held. Istanbul, 2014. P. 172992. <https://doi.org/10.2118/172992-MS>.
17. Jeng J.-T., Chuang C.-C., Su S.-F. Support vector interval regression networks for interval re-gression analysis // Fuzzy Sets and Systems. 2003. Vol. 138. Iss. 2. P. 283–300. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00570-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00570-5).
18. Klir G.J., Yuan B. Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1995. 574 p.
19. Fink J. Petroleum engineers guide to oil field chemicals and fluids. Waltham: Gulf Professional Publishing,



2011. 808 p.

20. Akangbou H.N., Burby M., Nasr G. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil

reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 150. P. 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.12.005>.

References

1. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesursy = Georesources*. 2020;22(3):87-96. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ornybd>, <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>.
2. Dmitrievsky A.N., Duplyakin V.O., Eremin N.A., Kapranov V.V. Algorithm for creating a neural network model for classification in systems for preventing complications and emergencies in construction of oil and gas wells. *Datchiki & Systemi = Sensors & Systems*. 2019;12:3-10. (In Russ.). <https://elibrary.ru/nkrfen>, <https://doi.org/10.25728/datsys.2019.12.1>.
3. Hinton G.E., Osindero S., Teh Y.-W. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*. 2006;18(7):1527-1554. <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>.
4. Tahmasebi P., Hezarkhani A. Hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation. *Computers & Geosciences*. 2012;42:18-27. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.004>.
5. Kaydani H., Mohebbi A., Baghaie A. Neural fuzzy system development for the prediction of permeability from wireline data based on fuzzy clustering. *Petroleum Science and Technology*. 2012;30(19):2036-2045. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.531345>.
6. Shakirova E.V., Semykin M.V., Aleksandrov A.A., Bryzhevatykh N.V. Modern methods for the selection of effective demulgators for oil dehydration in Eastern Siberia. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*. 2021;3:36-44. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ridjiu>, <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-3-36-44>.
7. Ben-Hur A., Horn D., Siegelmann H.T., Vapnik V. Support vector clustering. *Journal of Machine Learning Research*. 2001;2:125-137. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.5187>.
8. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical recipes: the art of scientific computing*. New York: Cambridge University Press; 2007. 1235 p.
9. Shakirova E.V., Aleksandrov A.A., Semykin M.V. Development of a new empirical correlation for predicting formation volume factor of reservoir oil using artificial intelligence. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):408-416. (In Russ.). <https://elibrary.ru/vrenyh>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-408-416>.
10. Trontl K., Šmuc T., Pevec D. Support vector regression model for the estimation of γ-ray buildup factors for multi-layer shields. *Annals of Nuclear Energy*. 2007;34(12):939-952. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.05.001>.
11. Gholami R., Shahraki A.R., Jamali Paghaleh M. Prediction of hydrocarbon reservoirs permeability using support vector machine // *Mathematical Problems in Engineering*. 2012:670723. <https://doi.org/10.1155/2012/670723>.
12. Averkina E.V., Shakirova E.V. Specifics of drilling wells in the abnormally-high-pressure rock beds in the oil-and-gas fields of Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2019;229:012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012032>.
13. Belozeroва O.V., Kovalenko V.V., Shakirova E.V. Study of the composition and properties of crude oil mined at the Ichyodinskoye field. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(3):522-528. (In Russ.) <https://elibrary.ru/yzyzxy>, <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-522-528>.
14. Averkina E.V., Shakirova E.V., Nikolaeva M.B., Klimova A.A. Comparative analysis of reagents-inhibitors of swelling of clay deposits used in Eastern Siberia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12):138-145. (In Russ.) <https://elibrary.ru/teeamu>, <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2947>.
15. Lippmann R.P. An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine*. 1987;4(2):4-22.
16. Rammay M.H., Abdulraheem A. Automated history matching using combination of adaptive neuro fuzzy system (ANFIS) and differential evolution algorithm. In: *SPE Large scale computing and big data challenges in Reservoir simulation conference and exhibition held*. Istanbul; 2014, p. 172992. <https://doi.org/10.2118/172992-MS>.
17. Jeng J.-T., Chuang C.-C., Su S.-F. Support vector interval regression networks for interval regression analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 2003;138(2):283-300. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00570-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00570-5).
18. Klir G.J., Yuan B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR; 1995. 574 p.
19. Fink J. *Petroleum engineers guide to oil field chemicals and fluids*. Waltham: Gulf Professional Publishing; 2011. 808 p.
20. Akangbou H.N., Burby M., Nasr G. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017; 150:128-136. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.12.005>.



Информация об авторах / Information about the authors



Шакирова Эльвира Венеровна,
кандидат политических наук, доцент,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ viva160@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0605-2920>
Elvira V. Shakirova,
Cand. Sci. (Polit.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ viva160@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0605-2920>



Семькин Михаил Вячеславович,
студент,
Передовая инженерная школа,
Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Россия,
siemykin99@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6134-1656>
Mikhail V. Semykin,
Student,
Advanced Engineering School,
University of Tyumen,
Tyumen, Russia,
siemykin99@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6134-1656>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 26.05.2023.

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 26.05.2023.



ПЕРСОНАЛИЯ

УДК 553.43

<https://elibrary.ru/knevny><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-234-243>**Геология из рук в руки (к 85-летию профессора
Алексея Ивановича Трубачева)****А.Т. Корольков^а**^а*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. Представленный материал посвящен судьбе одного из наиболее известных выпускников Иркутского политехнического института (ныне Иркутский национальный исследовательский технический университет) профессора Алексея Ивановича Трубачева и его роли в становлении молодого геолога. В ходе работы были обобщены опубликованные материалы и воспоминания автора статьи, в результате чего составлен очерк о жизни и творческой деятельности Алексея Ивановича. Сразу после окончания вуза Алексей Иванович был направлен в Забайкальский комплексный научно-исследовательский институт в г. Чите и стал работать в группе исследователей уникального Удоканского месторождения медистых песчаников и сланцев, которую возглавлял известный ученый заместитель директора института Леонид Францевич Наркелюн. Изучению вещественного состава рудных тел Удоканского месторождения посвящены самые крупные работы А.И. Трубачева, результаты которых отражены в его кандидатской диссертации, защищенной в Иркутском политехническом институте, а также в докторской диссертации, защита которой прошла в Новосибирске. Во всех своих работах А.И. Трубачев доказывал первично-осадочный генезис стратиформных руд Удоканского месторождения, что подтвердилось результатами детальной разведки. В 1974 году он перешел на преподавательскую работу. В настоящее время Алексей Иванович является профессором кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья Забайкальского государственного университета. За время работы в разных организациях им опубликовано 376 работ, среди которых 18 монографий, 19 учебно-методических пособий и учебников по минералогии, петрографии и промышленной минералогии. А.И. Трубачев является активным участником создания уникального минералогического музея Забайкальского государственного университета. Особое внимание в статье уделяется также роли Алексея Ивановича в становлении молодого геолога при полевых работах на Удоканском месторождении. Полевая производственная практика является главной в становлении молодого геолога. Наибольшее значение при этом имеет доверие полевого наставника и раннее самостоятельное проведение маршрутов. Такие ученые-геологи, как профессор А.И. Трубачев, имеющие большой стаж полевых исследований и педагогической работы в вузе, несомненно, входят в золотой фонд научно-педагогических кадров Сибири.

Ключевые слова: медистые песчаники и сланцы, Удоканское месторождение, борнит-халькозин-халькопиритовые руды, косая слоистость, первично осадочный генезис, полевые работы, наставник

Для цитирования: Корольков А.Т. Геология из рук в руки (к 85-летию профессора Алексея Ивановича Трубачева) // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 234–243. <https://elibrary.ru/knevny>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-234-243>.

PERSONALIA

**Geology from hand to hand (to the 85th anniversary
of the Professor Aleksey Ivanovich Trubachev)****Aleksey T. Korolkov^a**^а*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. This article is devoted to the Professor Aleksey Ivanovich Trubachev who is one of the most famous graduates of the Irkutsk Polytechnic Institute (now Irkutsk National Research Technical University), and his role in the formation of a young geologist. Summarized published materials of the author of the article and his memoirs were transformed into an essay on the life and creative activity of Aleksey Ivanovich Trubachev. Immediately after the graduation, he was sent to Trans-Baikal Integrated Research University (Chita) and joined a group of researchers investigating the unique Udokan deposit of copper sandstones and shales, which was headed by a well-known scientist, Deputy Director of the Institute



Leonid Frantsevich Narkelyun. The largest works of A.I. Trubachev deal with the study of the material composition of the Udokan deposit ore bodies, the results of which are reflected in his candidate's dissertation defended at the Irkutsk Polytechnic University and in his doctoral dissertation defended in Novosibirsk. In all his works A.I. Trubachev proved the primary sedimentary genesis of the stratiform ores of the Udokan deposit, which was confirmed by the results of detailed exploration. In 1974, he started his teaching career. Today Aleksey Ivanovich is a professor at the Department of Minerals and Secondary Raw Materials Processing at the Trans-Baikal State University. For the period of his professional career, he has published 376 works, including 18 monographs, 19 teaching aids and textbooks on mineralogy, petrography and industrial mineralogy. A.I. Trubachev is actively involved in the creation of the unique mineralogical museum at the Trans-Baikal State University. The article pays special attention to the role of A.I. Trubachev in the formation of a young geologist during field works at the Udokan deposit. Field production practice is a major in the formation of a young geologist. In this case the most important things are the trust of the field mentor and early independent routing. Geologists and scientists like Professor A.I. Trubachev with extensive field and pedagogical experience certainly belong to the golden fund of the scientific and pedagogical personnel of Siberia.

Keywords: copper sandstones and shales, Udokan deposit, bornite-chalcocite-chalcopyrite ores, oblique lamination, primary sedimentary genesis, field work, mentor

For citation: Korolkov A.T. Geology from hand to hand (to the 85th anniversary of the Professor Aleksey Ivanovich Trubachev). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):234-243. (In Russ.). <https://elibrary.ru/knevny>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-234-243>.

Введение

Известному ученому профессору Забайкальского государственного университета (ЗабГУ) Алексею Ивановичу Трубачеву 17 апреля 2023 года исполнилось 85 лет (рис. 1). Вся жизнь Алексея Ивановича представляет собой верное служение геологии, а наиболее важные его исследования связаны с Удоканским месторождением медистых песчаников и сланцев. Геология, как и медицина, требует передачи практических навыков из рук в руки через опытного и умного наставника. В связи с этим в первую очередь нам особенно хочется подчеркнуть значение Алексея Ивановича Трубачева в полевой жизни молодого неопытного геолога.

В разные годы одному из наиболее известных выпускников Иркутского политехнического института (ИПИ, затем Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрГТУ), сейчас Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)) профессору Алексею Ивановичу Трубачеву были посвящены многочисленные публикации – статьи, сборники, интервью и т. д., освещающие разные грани его деятельности и научного творчества. Предлагаемый материал, в свою очередь, посвящен судьбе этого выдающегося для Забайкалья человека в целом, а также его роли в становлении молодого геолога. В ходе написания были обобщены опубликованные ранее материалы и уникальные воспоминания автора статьи.



Рис. 1. Профессор Алексей Иванович Трубачев
2013 год

Fig. 1. Professor Aleksey Ivanovich Trubachev
2013

Материалы и методы исследования

В работе детально рассмотрен полевой процесс использования метода фациального анализа месторождений осадочного генезиса, которым автор овладел под руководством Алексея Ивановича Трубачева во время первой производственной геологической практики. В далеком 1971 году 20-летним студентом по воле случая я оказался в междуречье Нирунгнакана и Ингамакита (фланги Удоканского месторождения медистых песчаников и сланцев) в полевом геологическом отряде Забайкальского комплексного научно-исследовательского института (ЗабНИИ), который



возглавлял А.И. Трубачев. Надо сказать, что тогда на севере Забайкальского края полевые работы осуществлялись несколькими группами геологов-удоканщиков ЗабНИИ. Всеми этими работами руководил Леонид Францевич Наркелюн, который специально приехал из далекого Дзержинска в Забайкалье изучать вещественный состав и условия формирования рудных залежей недавно открытого уникального Удоканского месторождения, оставив престижную и высокооплачиваемую должность главного геолога меднорудного комбината. В Чите нашлись энергичные геологи, загоревшиеся исследованием данной проблемы – Ю.П. Безродных, В.С. Салихов, А.И. Трубачев, Г.А. Юргенсон. Работа этой группы ученых была успешной и плодотворной – по результатам своей разносторонней деятельности в пределах Удоканского района они защитили кандидатские и докторские диссертации (1 кандидат и 4 доктора геолого-минералогических наук).

Вначале в г. Чите я познакомился с кандидатом геолого-минералогических наук Юрием Петровичем Безродных – обаятельным человеком, который произвел на меня, еще молодого студента, впечатление настоящего геолога и согласился взять к себе в отряд на производственную практику. Но спросил, почему я приехал устраиваться один. Действительно, в ЗабНИИ на работу мы были приглашены с моим другом-однокурсником. Пришлось пояснить, что мой друг скоро прилетит в Читу, как обещал, к определенной дате. Несколько раз я ездил встречать в аэропорт очередные рейсы из Иркутска, пока у Юрия Петровича не лопнуло терпение. Позже я узнал, что однокурсник меня подвел: раньше меня прилетел в Читу и отправился вместо ЗабНИИ в Читинское геологическое управление... Вскоре после этого Ю.П. Безродных передал меня другой группе – было предложено лететь в п. Чара вместе с кандидатом геолого-минералогических наук А.И. Трубачевым и его сотрудниками.

Невысокий энергичный человек с умными пытливыми глазами окинул взглядом щуплого студента. Наверное, вначале я ему не понравился. Без лишних слов он ознакомил меня с предстоящими работами и сотрудниками от-

ряда. Работать предстояло практически все лето в составе пяти человек (начальник отряда, студент, два рабочих и повара). Вскоре мы вылетели в Чару с нехитрым снаряжением. Помню, из окна самолета меня очень удивила пустыня с барханами, окруженная высокими скалистыми горами с белыми пятнами ледников. Суровый край! А когда приземлились в Чаре, поразило, что каждый день солнце скатывается вечером в зубатую пасть Кодарских гор. Невольно у меня в голове стали складываться строчки стихотворения, отражающие безвозвратную потерю времени:

«Горный контур день сторожит,
А вечером Солнце глотает.

Оно так печально-покорно скользит,
Огненными красками стекает...».

Оказалось, что собственного транспорта у нас не было. Переезжать с одного места на другое нужно было с помощью геофизиков-каротажников, имевших трактор и большие сани из бревен, на которых стояла палатка с оборудованием. Сезон же выдался очень дождливым. В условиях многолетней мерзлоты по одной и той же колее проехать дважды было невозможно. Однажды наш трактор застрял капитально – пришлось искать второй. Представьте картину: два почти утонувших трактора, гусеничный и колесный, тащат палатку... по воде, потому что бревна саней погружены в жидкую грязь. Кроме того, часто приходилось делать многодневные маршруты, чтобы выполнить намеченный план работ.

Рудные тела медистых песчаников и сланцев, представленные в различной степени измененными халькозин-борнит-халькопиритовыми рудами, сформировались преимущественно на мелководье, в литорали. В связи с этим в маршрутах требовались детальные структурно-геологические наблюдения за косой и волнистой слоистостью пород, рудными минералами косых серий. По обнажениям рек и ручьев составлялись частные стратиграфические разрезы. Конечной целью всех этих наблюдений являлось составление литолого-фациальной схематической карты для флангов Удоканского месторождения медистых песчаников и сланцев.

Очень ярко мне запомнился первый самостоятельный маршрут, который Алексей Ива-



нович почему-то доверил неопытному студенту почти сразу же после приезда на участок. Когда мы еще подходили вместе с ним к началу маршрута, нам встретились свежие медвежьи следы. Но вот ружья у нас не было. Тогда Алексей Иванович с юмором и уверенностью посоветовал почаще колотить молотком встречающиеся образцы пород, громко разговаривать или напевать песни. Так молодой геолог-студент стал без усталости работать молотком и нагружать рюкзаки отбитыми образцами пород. Маршрутным рабочим в тот раз определили тезку Алексея, который недавно отслужил в армии и был заядлым курильщиком. К сожалению, снабжение нашего отряда продуктами и сигаретами было весьма скромным и привезенные из Читы запасы сигарет также закончились достаточно скоро. В итоге Алексей впал в отчаяние и пытался везде, где мы были, искать окурки – если встречались на пути охотничьи зимовья, даже вскрывал доски пола. Кроме него никто в отряде не курил. В очередной раз мы убедились, какая это пагубная страсть...

А вот у Алексея Ивановича Трубачева проявилось другое увлечение. Такого удачливого рыбака мне не встречалось за всю жизнь! Поскольку большинство его и моих маршрутов проходило по коренным обнажениям долин рек и ручьев, отряд питался великолепным таежным хариусом различными способами приготовления: жареным, копченым, соленым, вяленым. Практически все это рыбное изобилие связано было с ежедневной добычей А.И. Трубачева. Конечно, другие тоже пробовали ловить рыбу. Но самая богатая удача сопровождала всегда нашего начальника отряда! Забегая вперед, следует сказать о рыбалке в междуречье Ниругнакана и Ингамакита. Позже, работая в иркутском Восточно-Сибирском научно-исследовательском институте геологии, геофизики и минерального сырья в 1984 и 1985 годах, я встретился с геологами Удоканской экспедиции в п. Чара и заинтересовался рыбалкой в долинах этих рек. На что они мне ответили: «Разве вы не знаете, что построили БАМ? Хорошую рыбу можно встретить только в самых верховьях этих рек. А в средней и нижней части рек Ниругнакан и Ингамакит всю рыбу строители-бамовцы вы-

ловили, часто варварски (применяя взрывчатку)...».

Конечно, необычная геология захватила. Однажды в маршруте я даже чуть не получил серьезную травму. Документируя довольно сыпучие медистые песчаники и сланцы, стал подниматься вверх по обрывистому склону реки при полном снаряжении: за спиной тяжелый рюкзак с образцами, в одной руке молоток, в другой – компас. Где-то на середине склона оступился и полетел вниз. Когда очнулся, то увидел над собой побелевшее лицо маршрутного рабочего. Все обошлось – отделался крупными синяками. Видимо, спасло то, что упал не на камни, а в глубокую речную яму. Пришлось упрашивать рабочего, чтобы этот случай остался в секрете от начальника. В дальнейшем старался быть осторожнее – недаром говорится, что человек учится на собственных ошибках и падениях.

Трудным испытанием были многодневные маршруты. Легких и теплых спальных мешков у нас не было, и из-за неподъемных ватных мешков мы брали с собой только брезентовые чехлы от них, теплые свитера, крупные куски полиэтиленовой пленки, банки с тушенкой и другими продуктами. Рюкзаки изрядно весили вначале, но еще больше – в конце многодневного маршрута, так как были нагружены найденными образцами пород. Спали на теплой земле под полиэтиленовой пленкой, предварительно нагрев площадку большим костром и сдвинув его в сторону. Конечно, к утру замерзали. Первым неизменно просыпался Алексей Иванович, подбадривал нас... Несколько раз в маршруте совсем рядом встречали изюбрей. Хотя у начальника отряда было ружье, убивать их мы не стали – рюкзаки наши и так были очень тяжелыми.

Впечатлила меня встретившаяся Солдатская сопка, на которую мы вышли в многодневном маршруте. Поразили хорошо сохранившиеся казармы военнослужащих и огромные бухты очень толстого кабеля. Создавалось впечатление, что люди здесь были какую-то неделю назад. Позже я узнал, что такой кабель солдаты протянули к самым богатым рудам Удоканского месторождения медистых песчаников и сланцев. Планировалось произвести мощные взрывные работы, чтобы



в дальнейшем отрабатывать это гигантское месторождение карьером, но испытания наземных ядерных бомб запретили, что спасло этот район от радиоактивного заражения.

Почти четыре месяца продолжались полевые работы. Закончились основные продукты – остался только хариус во всех видах и макароны, которые повариха размачивала для приготовления лепешек. В конце сезона Алексей Иванович подарил каждому вяленой, копченой или соленой рыбы для угощения домашних. Ах, какой это был вкусный таежный деликатес! Рюкзак и вся полевая одежда еще долго запахом костра и копченой рыбы будоражили воображение! А какие я привез в Иркутск образцы песчаников нижнепротерозойской сакуканской свиты с косой слоистостью, инкрустированной синим борнитом, серым халькозином, бронзово-желтым халькопиритом, зеленым малахитом или черным магнетитом! Мои друзья в общежитии были восхищены! Потом была защита отчета по первой производственной практике, которую принимал профессор Петр Иванович Налетов – основатель геологического музея Иркутского государственного университета (ИГУ). Конечно, все представленные на защите образцы он забрал для экспозиций.

Запомнились слова, которые Алексей Иванович сказал при расставании: «Из тебя выйдет хороший геолог!...». До первой производственной практики меня терзали некоторые сомнения в правильности выбранного пути. Но эти простые слова настоящего геолога, начальника отряда после трудного полевого сезона просто окрылили! Первая самостоятельная работа стала началом тернистого пути, а вера А.И. Трубачева в мои геологические способности много раз вспоминалась мной при преодолении различных препятствий.

Второй раз мы с Алексеем Ивановичем Трубачевым, ставшим к тому моменту профессором ЗабГУ, встретились... почти через 50 лет – в 2020 году, когда я и сам уже стал доктором геолого-минералогических наук и работал профессором геологического факультета ИГУ. Объектом моих исследований после 1971 года были золоторудные районы юга Восточной Сибири (Балейский, Бодайбин-

ский, Гарганский, Еравненский, Муйский) и структуры различных золоторудных месторождений в пределах Восточного Забайкалья, Восточного Саяна, притрассовой части Байкало-Амурской магистрали (север Бурятии и Забайкальского края), Кодара, Станового хребта (западной части Алданского щита). Кроме того, вместе со студентами ИГУ мне удалось побывать на самом перспективном месторождении медистых песчаников и сланцев Польши (в шахте на глубине более 1000 м) и узнать, что при эксплуатации месторождения в качестве главной принята гипотеза первично-осадочного генезиса [1]. Все эти годы Алексей Иванович не оставлял меня без внимания: часто звонил, делал рецензии на все мои работы (кандидатскую и докторскую), присылал свои статьи, учебники и монографии. Соответственно, я тоже делился с ним своими публикациями, монографиями, учебниками. Видимо, еще в 1971 году он посчитал меня своим младшим другом после памятного полевого сезона. Такая верность геологическому братству восхищает и дает пример! А недавно мы сделали хорошую статью по генезису удоканских руд, опубликованную в престижном издании [2], и приняли участие в научной конференции в Кракове [3]. При встрече знания о характере и творческом пути Алексея Ивановича дополнились для меня новой информацией, новыми учебниками и монографиями. Особенно поразил геологический музей ЗабГУ им. профессора Л.Ф. Наркелюна, созданный при деятельном участии моего полевого учителя на первой производственной практике: отдельная комната данного музея составлена из золотоносных образцов уникальных Балейского и Тасеевского месторождений (рис. 2).

Следует сказать, что г. Балей является местом моего рождения и работы в течение пяти лет после окончания университета [4]. В 1990-е годы, когда прекратилось финансирование Балейской геолого-разведочной экспедиции, сотрудники ЗабГУ при активном участии А.И. Трубачева сумели сохранить и вывезти в Читу уникальные экспонаты из Балей. Теперь они служат прекрасными примерами для студентов-геологов и всех посетителей музея.



**Рис. 2. Профессора А.Т. Корольков (слева) и А.И. Трубачев (справа)
у стенда с образцами Балеysкого месторождения геологического музея
Забайкальского государственного университета
2020 год**

**Fig. 2. Professors A.T. Korolkov (on the left) and A.I. Trubachev (on the right)
at the stand with Baleys deposit samples in the Geological Museum
of the Transbaikalian State University
2020**

Поддержка Алексея Ивановича в качестве умного и доброго наставника согревает меня и сейчас. Недавно он прислал необычный подарок – каменную книгу из забайкальских минералов с характерным названием «Геодинамика и рудообразование», очевидно, намекая на то, чтобы я работал в этом интересном и перспективном направлении.

Результаты исследования

Только при встрече почти через полвека детально я ознакомился с той схематичной геолого-структурной картой междуречья Нирунгнэкан и Ингамакита с элементами литолого-фациальных наблюдений, в составлении которой принимал участие будучи студентом. На ней показано разнообразие литоральных фациальных обстановок, которые мы изучали вместе с А.И. Трубачевым, составляя детальные частные стратиграфические разрезы и делая структурно-геологические наблюдения за ориентировкой косої слоистости. Эта карта вошла в научно-исследовательский отчет сотрудников ЗабНИИ 1972 года¹.

Творческий путь Алексея Ивановича Трубачева. Вклад Алексея Ивановича в развитие молодого геолога трудно переоценить, но не

менее интересна и его личная судьба. Родился и вырос герой моего очерка в деревенском степном Казахстане [5]. Семья его была многодетной: помимо Алексея Ивановича в ней был еще один сын и три дочери. Очень рано он познал голод военного времени и послевоенные трудности. Его отец погиб во время Великой Отечественной войны и был похоронен в братской могиле. Матери пришлось одной поднимать пятерых детей. Поэтому Алексей еще в детстве столкнулся с тяготами деревенского труда – его детство буквально украла война. Геологией же он стал увлекаться рано. Вслед за старшей сестрой поступил в Семипалатинский геологоразведочный техникум, который с отличием закончил в 1956 году. Запомнил на всю жизнь испытание водородной бомбы на Семипалатинском полигоне, когда в здании техникума вылетели стекла из окон... Алексей Иванович очень благодарен преподавателям Семипалатинского геологоразведочного техникума за надежные теоретические и практические знания и за то, что они очень рано приучили его к самостоятельности. После окончания техникума А.И. Трубачев работал на геологической съемке и поисках урана в Республике Туве не-

¹ Наркелюн Л.Ф., Трубачев А.И., Безродных Ю.П., Салихов В.С. Литолого-фациальная и геохимическая характеристика отложений удоканской серии Сюльбанского и Намингинского районов: окончательный отчет. Чита: Изд-во ЗабНИИ, 1972. 202 с.



далеко от Кызыла. В 1957 году стал студентом ИПИ, который с отличием закончил в 1962 году. Вместе с ним на этом курсе учились замечательные ребята, впоследствии многие из них стали кандидатами и докторами наук (рис. 3). Во время обучения Алексей Трубачев три года избирался комсомольским секретарем курса, увлекался спортом (лыжи, коньки, стрельба, спортивное ориентирование, велосипед).

В Иркутске Алексей Иванович обучался у замечательных преподавателей ИПИ (ныне ИРНИТУ). Среди них ему особенно запомнились следующие профессора и доценты: Всеволод Николаевич Данилович (структурная геология, геотектоника), Михаил Михайлович Лавров (историческая геология), Сергей Андреевич Вахромеев (месторождения полезных ископаемых), Адриан Федорович Ли (минералогия), Дора Михайловна Корытова (практическая петрография), Лев Владимирович Таусон (геохимия), Нина Александровна Львова (петрография осадочных пород), Евгений Дмитриевич Иньшин (минералогия) и другие.

В 1962 году после окончания ИПИ А.И. Трубачев был направлен в ЗабНИИ г. Читы. Этот научно-исследовательский институт образовался годом ранее. Почти сразу Алексей Ива-

нович стал работать в отделе заместителя директора Леонида Францевича Наркелюна по исследованию вещественного состава и геологических условий формирования рудных тел Удоканского месторождения. Верность этой теме и крепкую дружбу со своим научным руководителем Л.Ф. Наркелюном он пронес через всю жизнь. В 1969 году А.И. Трубачев защитил кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия оруденения медистых песчаников Восточной Сибири и некоторые вопросы их генезиса» на ученом совете родного ИПИ в г. Иркутске².

В 1974 году на базе Читинского филиала ИПИ был создан новый Читинский политехнический институт (сейчас ЗабГУ), где в то время работал единственный профессор Л.Ф. Наркелюн, пригласивший в тот же год своего ученика и коллегу А.И. Трубачева на должность доцента недавно созданной кафедры геологии. Учебные пособия, минералогические коллекции, программы лекций, лабораторных занятий, учебных и полевых практик пришлось создавать вместе всем сотрудникам кафедры практически с нуля. Специфика работы с молодежью требовала профессионализма, строгости одновременно с доброжелательностью и пониманием студентов. При этом необходимо было заниматься научно-



**Рис. 3. А.И. Трубачев (первый слева в нижнем ряду)
на встрече с однокурсниками Иркутского политехнического института
1982 год**

**Fig. 3. A.I. Trubachev (the first from the left in the bottom row)
at the reunion of course mates of the Irkutsk Polytechnic Institute
1982**

² Трубачев А.И. Минералогия оруденения медистых песчаников Восточной Сибири и некоторые вопросы их генезиса: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 1969. 313 с.



исследовательской работой по бюджетным и хоздоговорным темам. Благодаря инициативе Л.Ф. Наркелюна сотрудники кафедры начали создавать геологический музей. Ректорат поддерживал инициативу и выделил финансирование для поездок за образцами минералов на Урал и в различные районы Забайкалья. В 1975 году музей был торжественно открыт. В нем представлены в большом количестве рудные образцы почти всех месторождений России, которые сейчас отрабатываются (свыше 5000).

Загруженность учебно-воспитательной и организационной работой не помешала Алексею Ивановичу активно заниматься наукой. В 1986 году в Новосибирске на ученом совете Института геологии и геофизики СО АН СССР он защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по теме «Парагенетический анализ медистых песчаников и сланцев, их связи с осадочно-рудноносными формациями и структурами земной коры»³. В 1988 году Высшая аттестационная комиссия (ВАК) присвоила ему звание профессора. С 1990 по 1996 год Алексей Иванович заведовал кафедрой геологии, пока ее не расформировали по нелепому случаю. Сейчас он работает профессором кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья ЗабГУ.

А.И. Трубачев обладает большой целеустремленностью и работоспособностью, активно печатает свои работы по различным разделам геологии (геолого-минералогические, геолого-технологические, научно-популярные, а также освещающие историю геологических исследований в Забайкалье). К настоящему времени А.И. Трубачевым опубликовано 376 работ. Из них 20 монографий (самостоятельных и в соавторстве), 18 учебных и учебно-методических пособий, 1 учебник по технологической минералогии⁴, около 100 статей в высокорейтинговых журналах, множество статей в сборниках материалов и тезисов докладов конференций различного уровня. Особенно хочется отметить легкий профессиональный слог этого ученого и его

внимание к своим коллегам. Его перу принадлежит множество очерков об известных геологах и горняках. В 2010 году вышла в свет небольшая книжка его авторства о преподавателях Семипалатинского геологоразведочного техникума «Нас учили самостоятельности» [6], а в 2022 году был выпущен отдельный сборник «Этюды об ученых Забайкалья» [7].

Достижения. Алексей Иванович Трубачев – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья ЗабГУ, почетный работник ЗабГУ, заслуженный геолог Читинской области, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, ветеран труда, обладатель значка «Альпинист СССР», действительный член Минералогического общества при Российской академии наук, академик Международной академии минеральных ресурсов, член-корреспондент Российской академии естественных наук. Он также является членом нескольких ученых советов по защите докторских и кандидатских диссертаций в Чите и Улан-Удэ (ЗабГУ, Геологический институт СО РАН), членом редколлегии журнала, входящего в перечень ВАК, в Чите (ЗабГУ), длительное время он был членом редколлегии журнала ВАК в Иркутске (ИрГТУ, сейчас ИРНТУ).

Заключение

Конечно, такие геологи с большим багажом практической и научно-исследовательской работы сейчас редкость среди преподавателей. Хочется пожелать Алексею Ивановичу здоровья и творческой активности на долгие годы. Совместную работу с ним в пределах Удоканского района я считаю для себя счастливой. Его доброта и внимание в течение долгих лет сделали его моим старшим другом. Как уже отмечалось ранее, полевая производственная практика является главной в становлении молодого геолога, и наибольшее значение при этом имеет доверие полевого наставника и раннее самостоятельное проведение маршрутов. Такие ученые-геологи, как профессор А.И. Трубачев, имеющие

³ Трубачев А.И. Парагенетический анализ медистых песчаников и сланцев, их связи с осадочно-рудноносными формациями и структурами земной коры: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 1986. 404 с.

⁴ Трубачев А.И. Технологическая минералогия: учебник для вузов. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2013. 329 с.



большой стаж полевых исследований и педагогической работы в вузе, входят в золотой фонд научно-педагогических кадров Сибири.

Хочется верить, что реформы высшего образования не скажутся негативным образом на специалистах такого высокого уровня.

Список источников

1. Корольков А.Т., Радомская Т.А., Ягуджинский Р. Генезис польских месторождений меди // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2016. Т. 17. С. 91–102. <https://elibrary.ru/wkbaid>.
2. Трубачев А.И., Корольков А.Т., Радомская Т.А. Парагенезисы минералов и формы их выделения – как отражение этапов формирования месторождений медистых песчаников и сланцев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 9. С. 70–89. <https://elibrary.ru/fqawik>, <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2257>.
3. Trubachev A.I., Korolkov A.T., Duchmal-Chernikiewicz A., Radomska T.A. Genetic models of formation of cupriferous sandstone and shale deposits (examples from

- Jezkazgan, Udokan and the Lubin – Głogów Copper District) // VIII Polish conference petrological and mineralogical studies in geology (Krakow, 1–2 June 2017). Krakow: National Research Institute and Mineralogical Society of Poland, 2017. P. 53.
4. Корольков А.Т. Научно-производственный комплекс Балеysкой геолого-разведочной экспедиции // Балеysкая новь. 2023. № 24. С. 8–9.
 5. Алексей Иванович Трубачев (к 75-летию со дня рождения) / сост. Н.А. Бобрович, вступ. статья В.С. Салихова. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2013. 97 с.
 6. Трубачев А.И. Нас учили самостоятельности. Чита: Печатный двор, 2010. 62 с.
 7. Трубачев А.И. Этюды об ученых Забайкалья. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2022. 290 с.

References

1. Korolkov A.T., Radomska T.A., Jagodzinski R. The genesis of the copper deposits of Poland. *Izvestiya irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle» = Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”*. 2016;17:91-102. <https://elibrary.ru/wkbaid>. (In Russ.).
2. Trubachev A.I., Korolkov A.T., Radomska T.A. Parageneses of minerals and forms of their recognition reflecting the stages of formation of cupriferous sandstones and shales deposit. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(9):70-89. (In Russ.). <https://elibrary.ru/fqawik>, <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2257>.
3. Trubachev A.I., Korolkov A.T., Duchmal-Chernikiewicz A., Radomska T.A. Genetic models of formation of cupriferous sandstone and shale deposits (examples from

- Jezkazgan, Udokan and the Lubin – Głogów Copper District). In: *8th Polish conference petrological and mineralogical studies in geology*. 1–2 June 2017, Crakow. Crakow: National Research Institute and Mineralogical Society of Poland; 2017, p. 53.
4. Korolkov A.T. Scientific and production complex of the Baley geological exploration expedition. *Baleyskaya nov*. 2023;24:8-9. (In Russ.).
 5. Bobrovich N.A. *Aleksey Ivanovich Trubachev (on the occasion of his 75th birth anniversary)*. Chita: Transbaikalian State University; 2013. 97 p. (In Russ.).
 6. Trubachev A.I. *We were taught to be independent*. Chita: Pechatnyi dvor; 2010. 62 p. (In Russ.).
 7. Trubachev A.I. *Etudes about Trans-Baikal scientists*. Chita: Transbaikalian State University; 2022. 290 p. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Корольков Алексей Тихонович,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры динамической геологии,
Иркутский государственный университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ baley51@mail.ru
Aleksey T. Korolkov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Professor of the Department of Dynamic Geology,
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia,
✉ baley51@mail.ru

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.



The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 28.04.2023; accepted for publication 11.05.2023.



К ЮБИЛЕЙНЫМ ДАТАМ

УДК 378.016:811.161.1:378.147(510)

<https://elibrary.ru/iwldyk><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-244-256>К 50-летию Керуленской международной
геологической экспедицииЛ.А. Рапацкая^а^а*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. Целью представленной статьи является подведение итогов работы Керуленской международной геологической экспедиции, которая на протяжении полувека проводила производственную, образовательную и научно-исследовательскую деятельность на территории трех стран: России, Монголии и Китая. В Иркутском политехническом институте (ныне Иркутский национальный исследовательский технический университет) обучение студентов из Монголии началось в 1961 году. В связи с трудностями обучения монгольских абитуриентов была организована подготовительная кафедра, на которой в течение года будущие студенты могли овладеть русским языком. Автор рассмотрел актуальные проблемы российско-монгольского сотрудничества в сферах высшего образования и науки в Иркутском политехническом институте. На основе архивных материалов и опубликованных работ проанализированы процессы подготовки преподавательских, научных и инженерно-технических кадров для Монголии. Представлены итоги крупномасштабного картирования на территории 2500 км², по результатам которых были открыты месторождения углей, флюорита, вольфрама, олова и россыпного золота. Дана всесторонняя оценка практической и научно-исследовательской деятельности экспедиции, представленной в материалах 21 научной конференции, которые проходили с периодичностью один раз в два года на территории России, Монголии и Китая.

Ключевые слова: Керулен, геология, тектоника, магматизм, полевые работы, уголь, золото, флюорит, политехнический институт, проекты, студенты, договор, учебный процесс, инженерные кадры

Для цитирования: Рапацкая Л.А. К 50-летию Керуленской международной геологической экспедиции // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 244–256. <https://elibrary.ru/iwldyk>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-244-256>.

ANNIVERSARIES

On the 50th anniversary of the Kerulen International
Geological ExpeditionLarisa A. Rapatskaya^а^а*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the presented article is to summarize the results of the half-century work of the Kerulen International Geological Expedition engaged in industrial, educational and research activities in Russia, Mongolia and China. The Irkutsk Polytechnic Institute (currently Irkutsk National Research University) began to train Mongolian students in 1961. Due to the difficulties of training Mongolian students, a preparatory department was organized, where future students could master the Russian language. The author deals with the relevant issues of Russian-Mongolian cooperation in the fields of higher education and science at the Irkutsk Polytechnic Institute. On the basis of archival materials and published works, the training processes of academic, scientific and engineering staff for Mongolia have been analyzed. The article presents the results of a large-scale mapping on the territory of 2500 km² based of which the deposits of coal, fluorite, tungsten, tin and placer gold were discovered. The paper also gives a comprehensive assessment of the practical and research activities of the expedition presented in the materials of the 21 scientific conferences held every 2 years in Russia, Mongolia and China.

Keywords: Kerulen, geology, tectonics, magmatism, field work, coal, gold, fluorite, polytechnic Institute, projects, students, contract, educational process, engineering personnel



For citation: Rapatskaya L.A. On the 50th anniversary of the Kerulen International Geological Expedition. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):244-256. (In Russ.). <https://elibrary.ru/iwldyk>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-244-256>.

Введение

Создание Керуленской межвузовской (в будущем международной) геологической экспедиции (КМГЭ) явилось закономерным продолжением многолетних дружественных связей России и Монголии в области образования и науки. В 1952 году между Союзом Советских Социалистических Республик (СССР) и Монгольской Народной Республикой (МНР) было заключено соглашение об обучении граждан МНР в высших учебных заведениях СССР, согласно которому советская сторона брала на себя обязательство оплатить 50 % всех затрат на обучение монгольских граждан. Только за десять лет с 1951 по 1961 год в вузах Советского Союза было подготовлено 410 специалистов для Монголии. С 1960 года подготовка кадров для монгольского народного хозяйства начала приобретать массовый характер. Это было связано прежде всего с тем, что в Монголии с развитием промышленности ощущался большой дефицит квалифицированных специалистов. КМГЭ послужила той фундаментальной базой, которая была успешно использована в России и Монголии для подготовки кадров высшей школы, научно-исследовательской работы и специалистов инженерно-технического профиля.

Материалы и методы исследования

В октябре 1960 года между правительствами СССР и МНР было подписано соглашение об условиях взаимного обучения студентов и аспирантов в высших гражданских и научно-исследовательских учреждениях. В данном соглашении отмечалось, что расходы по обучению, а также обеспечение общежитием и бесплатным медицинским обслуживанием производятся за счет принимающей стороны на одинаковых условиях со студентами и аспирантами, являющимися гражданами своей страны.

К 1960 году обучение монгольских граждан осуществляли 148 высших учебных заведений в 19 городах Советского Союза.

Значительное увеличение числа монгольских студентов в вузах СССР наблюдалось в 1970-е годы. Так, если в 1960–1961 учебном году в вузах СССР обучалось 2083 студента и аспиранта, то в конце 1970-х годов это количество составило более 3000. До пандемии COVID-19 (в 2017–2018 учебном году) в высших учебных заведениях России обучалось 3198 монгольских студентов [1–3]. В последние годы российская сторона постепенно увеличивает количество мест в вузах страны для обучения граждан Монголии за счет бюджетных средств, что влечет за собой общее увеличение монгольских студентов в России [4, 5].

Эпоха сотрудничества Иркутского политехнического института (ИПИ, затем Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрГТУ), сейчас Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)) с Монголией началась в 1933 году, когда на рабочем факультете Сибирского горного института была проведена первая учебная подготовка для пятерых слушателей из Монголии. Именно с этого времени стали формироваться традиции многолетних и разносторонних контактов ИПИ с государственными организациями Монголии [6].

Системная подготовка иностранных специалистов началась в 1961 году в связи с увеличением потока монгольских студентов, обучающихся в СССР. В тот период в Монголии был принят план ускоренного развития промышленности. Для его осуществления требовалось большое количество специалистов инженерно-технического профиля. С целью обучения студентов из МНР в ИПИ сначала (в 1961 году) была организована секция, а затем (в 1963 году) – кафедра русского языка основных факультетов. Также был создан деканат, введена должность декана по работе с иностранными учащимися (деканы И.М. Куликов, Ю.А. Чернов, В.И. Снетков) [1, 2]. У истоков подготовки специалистов для Монголии в ИПИ стояли ректор А.А. Игошин, много лет возглавляв-



ший Иркутское областное отделение Общества советско-монгольской дружбы, проректоры А.И. Промптов, М.Ф. Клееров, Ю.А. Шелковников, В.М. Степанов, декан И.М. Куликов.

Ю.А. Чернов – декан подготовительного факультета ИПИ в 1979–1985 годах – так вспоминал о том времени: «Подготовительный факультет состоял из трех кафедр: русского языка, общественных дисциплин и естественных дисциплин. Большое внимание уделялось черчению, технической графике. Специфика подготовительного факультета заключалась в том, чтобы в очень короткий срок научить иностранных граждан говорить и писать на русском языке. Уровень подготовки монгольских учащихся был очень низкий, поэтому, чтобы пройти программу в течение одного года, нужно было вложить много сил и энергии. Наш подготовительный факультет готовил студентов из МНР для поступления в различные вузы России. Но в основном они предпочитали оставаться в Иркутске и поступать в ИПИ» [5, с. 119]. Особо следует отметить вклад в процесс обучения монгольских студентов профессора ИПИ В.М. Степанова – проректора по науке, заведующего кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии. Его конспект лекций по гидрогеологии Монголии¹ и фундаментальные исследования гидрогеологических структур Забайкалья [7] оказали большую помощь в обучении студентам и аспирантам.

КМГЭ послужила первым примером международного сотрудничества высших учебных заведений Монголии и России и в те далекие 1970-е годы была совершенно новым и уникальным явлением в области науки и образования. Идея проведения совместных работ на территории Монголии и России принадлежала профессору С. Дашдаваа, ее активно поддерживали ректор Монгольского государственного университета (МонГУ) академик Н. Содном и ректор ИПИ А.А. Игошин (рис. 1).

Создание КМГЭ началось в 1973 году с проведения съемочных работ масштаба 1:200000 в среднем течении р. Керулен силами преподавателей: доцентов С.В. Новосёлова, Ю.А. Чернова ИПИ со стороны России и

профессора С. Дашдаваа, доцента Ж. Ган-Очира при участии студентов МонГУ со стороны Монголии. Руководство экспедицией было поручено доценту кафедры геофизики ИПИ С.В. Новосёлову [8].

Перед экспедицией были поставлены достаточно амбициозные задачи:

- проведение комплексных геологических исследований на территории Восточной Монголии;
- осуществление геологической съемки и поисков полезных ископаемых по хозяйственным договорам с Геологической службой Монголии;
- подготовка высококвалифицированных кадров;
- решение целого ряда учебно-методических вопросов, в том числе повышение квалификации преподавательского состава, вовлечение преподавателей и студентов в научно-исследовательские работы, проведение учебных практик на полигонах учебных геологических баз ИПИ и МонГУ.

Удачным был менеджмент экспедиции, в котором финансовой основой явились хозяйственные договорные работы, начавшиеся в 1973 году геологическим картированием в бассейне р. Керулен. Подобные работы в практике высших учебных заведений проводились впервые и послужили в дальнейшем фундаментальной базой научных исследований.

Важным этапом в работе экспедиции явилось картирование Жанчивланского рудного массива, особенности геолого-структурной позиции которого обусловили богатейшую рудную минерализацию [9, 10].

В конце последних десятилетий прошлого и начале нынешнего века в вузах Китая активно изучался русский язык [11, 12]. В 1991 году к деятельности КМГЭ присоединился Хэбэйский геологический институт провинции Хэбэй Китайской Народной Республики во главе с ректором Янь Фэнь Минем, которого впоследствии сменил ректор Хао Дун Хэн. Работа началась в рамках программ «Региональные геологические системы Центральной Азии и их минерагения», «Геология и минерагения Центральной Азии». Сразу же был при-

¹ Степанов В.М. Гидрогеология Монгольской Народной Республики: конспект лекций. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1983. 91 с.



Рис. 1. Керуленская международная межвузовская геологическая экспедиция
Fig. 1. The Kerulen International Interuniversity Geological Expedition



нят к исполнению совместный проект «Тектоника и магматизм краевых систем юга Сибирской и севера Северо-Китайской платформ» (научный руководитель ректор Янь Фэнь Минь, исполнители Ню Шуин и Ли Цюмэй (Китай), профессор А.Н. Иванов (Россия)). План работ был утвержден на уровне министерств России и Китая и оформлен в качестве международного проекта на основе госбюджетного финансирования и с той, и с другой стороны.

Статус, регулирующий деятельность КМГЭ, был утвержден документом на уровне правительств, а именно «Положением о Керуленской международной геологической экспедиции», подписанным со стороны Монголии заместителем министра науки и образования Монголии Б. Дамдинсурэном, а со стороны России первым заместителем председателя Государственного комитета по высшему образованию Российской Федерации А.Н. Тихоновым (рис. 2). Также был избран совет экспедиции во главе с ректорами Иркутского и Монгольского политехнических институтов членом-корреспондентом РАН профессором С.Б. Леоновым и профессором Ч. Авдаем.

Кроме комплексного изучения геологии и полезных ископаемых Монголии и смежных территорий юга Сибири перед КМГЭ ставились задачи подготовки национальных кадров и повышения качества подготовки инженеров на горно-геологическом факультете Монгольского политехнического института. Также в положении о КМГЭ предусматривалось территориальное деление экспедиции на две части: советскую и монгольскую. Соответственно, и с той, и с другой стороны назначалась администрация КМГЭ: научные руководители и начальники экспедиции. Координация работ была поручена совету экспедиции, в состав которого входили ректоры, проректоры по научной работе, начальники экспедиций и ведущие ученые вузов.

Съемочные работы КМГЭ носили комплексный характер и послужили основой для тематических исследований. Петрографо-геохимические исследования проводились О. Гэрэл, В. Балжинням, структурные – Д. Чулууном, геоморфологические – Я. Болдом, геохимические – Г. Ухнаа, исследования по металлогении и рудной минерализации – Ч. Сэрэгтоном, геофизические исследования осуще-

ствлял Д. Дугараа. Результаты этих исследований были позже оформлены и защищены в качестве докторских и кандидатских диссертаций.

В последующие годы работы по хозяйственным договорам были продолжены, и их результатом явилось открытие месторождений угля, флюорита, слюдяных пегматитов, керамического сырья и ряда рудопроявлений. Основные направления совместных научно-исследовательских проектов были обозначены в следующих проектах:

1. Региональные геологические системы Центральной Азии (структура и минералогия).
2. Региональные геологические системы региональных разломов. Структурное положение, состав и минералогическая специализация зон региональных разломов.
3. Структурно-гидрогеологический анализ региональных геологических систем аридных зон.
4. Исследование условий формирования стволов скважин при бурении в сложных горно-геологических условиях рекуррентных орогенов.

В работе экспедиции в разное время принимали участие сотрудники Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН П.В. Коваль, Института земной коры СО РАН Ю.В. Комаров, а также преподаватели Фрайбергской горной академии.

В 1987 году КМГЭ впервые получила двустороннее финансирование. До 1997 года работы КМГЭ с российской стороны финансировались из государственного бюджета по единому наряду Министерства образования и по двум международным проектам. Данное финансирование было прекращено в 1997 году. Окончательный отчет под названием «Региональные геологические системы юга Сибири и сопредельных территорий Центральной Азии» был передан в министерство в том же году.

В проектах сразу оговаривались виды работ (полевые, камеральные), сроки исполнения, объемы финансирования с обеих сторон и виды отчетности (полевая документация, публикации). Обоснование госбюджетного финансирования, сметная стоимость работ, техническое задание на проведение научно-исследовательских работ и заказ-наряд КМГЭ представлены на рис. 3.

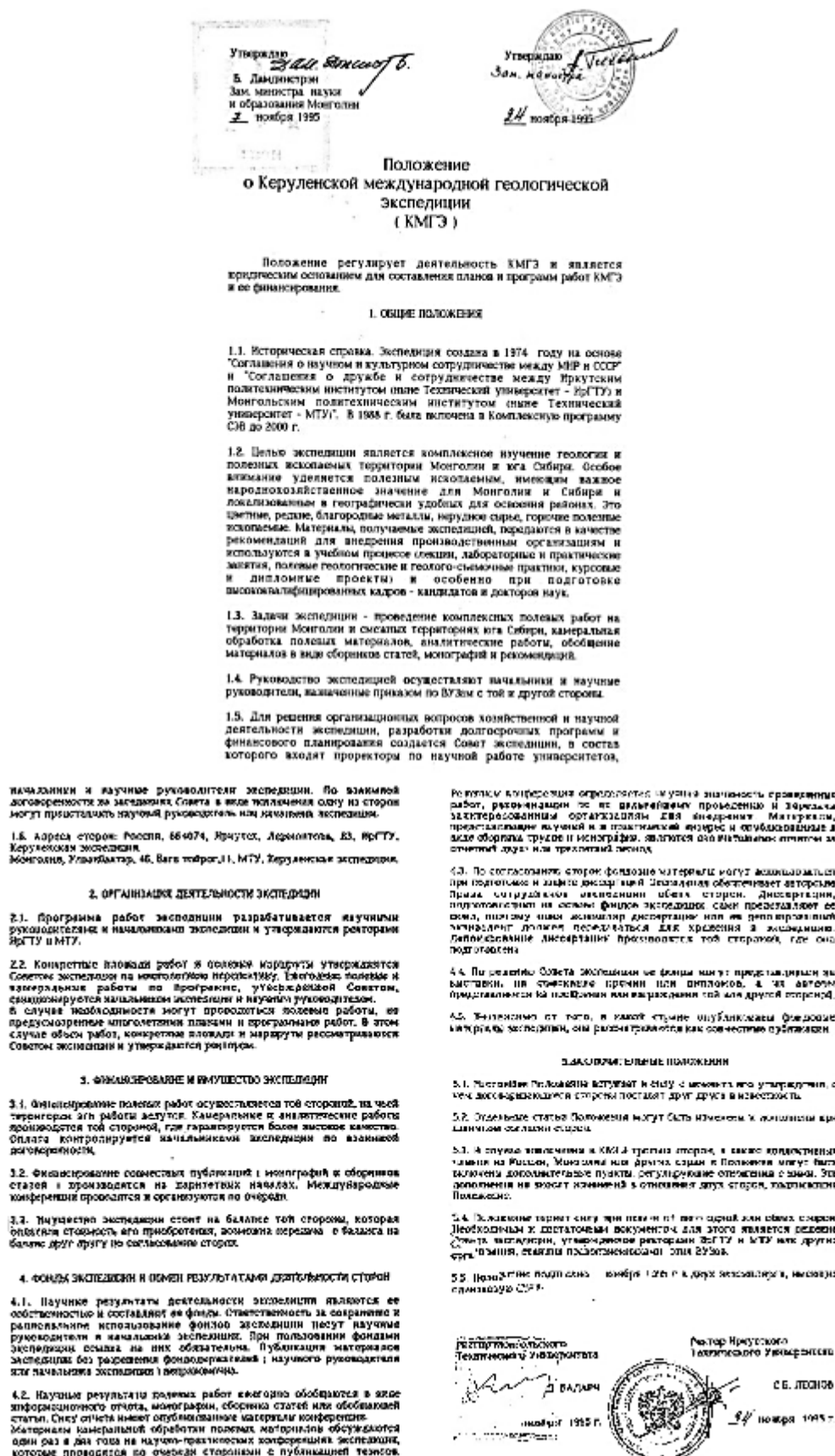


Рис. 2. Положение о Керуленской международной геологической экспедиции
Fig. 2. Regulations on the Kerulen International Geological Expedition

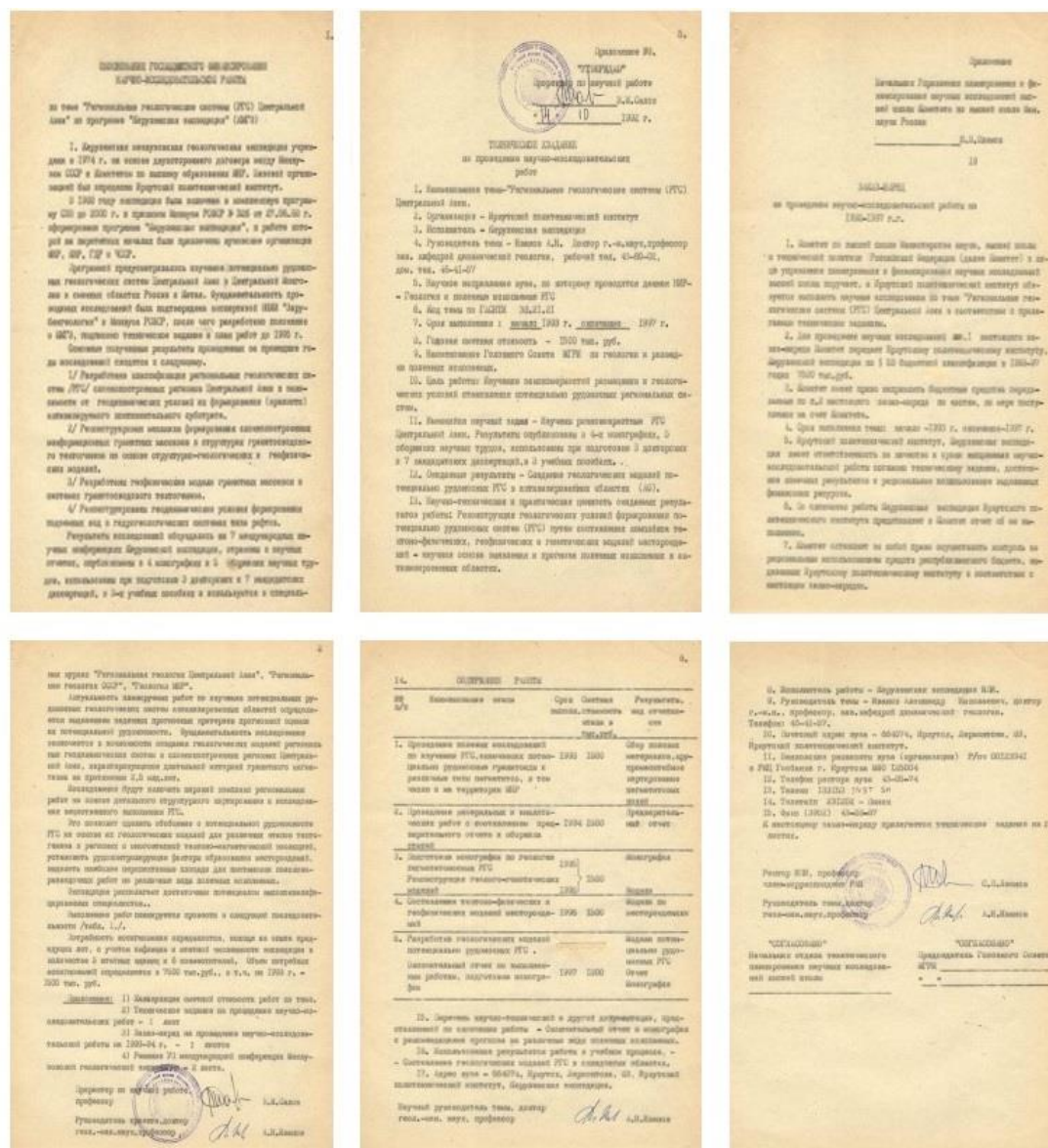


Рис. 3. Документация на проведение научно-исследовательских работ
Fig. 3. Documentation for research work

На территории Монголии выбор тематики работ экспедиции определялся договорами с Министерством геологии и горно-рудной промышленности МНР. В договоры включали геолого-съемочные и поисковые работы масштабов 1:50000 и 1:200000, изучение геологии и полезных ископаемых Жанчивланского, Нукут-Дабанского, Модотинского и Цаган-Дабанского рудных районов Центральной и Восточной Монголии, месторождений Эрдэнэт, Цав Говь-Ухтальского и Хаир-Аракского рудных районов. Российские геологи принимали участие на территории МНР в качестве соисполнителей и консультантов. Полевые же изыскания на территории Сибири в Прибайкалье и Забайкалье проводились только российскими

участниками КМГЭ – учеными ИПИ и научно-исследовательских институтов Сибирского отделения Российской академии наук.

Огромную роль в работе КМГЭ сыграли научные конференции, которые проводились поочередно на территориях стран-участниц с периодичностью один раз в два года (таблица). Основная цель конференций заключалась в обмене фактическими материалами, собранными членами КМГЭ по единой программе в разных странах за прошедший двухлетний период. Совместные доклады, представляемые на данных конференциях, служат важнейшим показателем международной интеграции вузовской науки стран, участвовавших в деятельности экспедиции.



Конференции Керуленской международной геологической экспедиции Conferences of the Kerulen International Geological Expedition

Очередность проведения	Страна проведения	Год проведения	Количество научных докладов
1	Монголия	1977	29
2	Россия	1980	74
3	Монголия	1982	51
4	Россия	1984	65
5	Монголия	1987	111
6	Россия	1989	108
7	Монголия	1991	152
8	Китай	1993	82
9	Монголия	1994	49
10	Россия	1995	106
11	Монголия	1997	93
12	Россия	1999	158
13	Китай	2001	198
14	Монголия	2003	59
15	Россия	2006	–
16	Китай	2009	40
17	Монголия	2011	–
18	Китай	2013	175
19	Россия	2015	87
20	Монголия	2017	–
21	Китай	2019	92

Примечание. Прочерком в таблице отмечены конференции, точное количество докладов в которых неизвестно.

Первая конференция состоялась в 1977 году в Улан-Баторе и сразу показала перспективность такого рода коммуникации. На конференции была предложена еще одна форма обмена информацией – издание сборников трудов, которое предшествовало конференции (рис. 4, 5).

В 1988 году КМГЭ была включена в комплексную программу Совета экономической взаимопомощи до 2000 года, после чего началось широкое обобщение материалов по ре-

гиональным геологическим системам Центральной Азии. Упор на выполнение этих задач позволил значительно расширить тематику VI и VII конференций экспедиции с привлечением специалистов других организаций из России, Монголии, Германии и Китая. В связи с этим на VI конференции 1989 года Керуленская межвузовская геологическая экспедиция получила название международной, сохранив свою прежнюю аббревиатуру – КМГЭ.

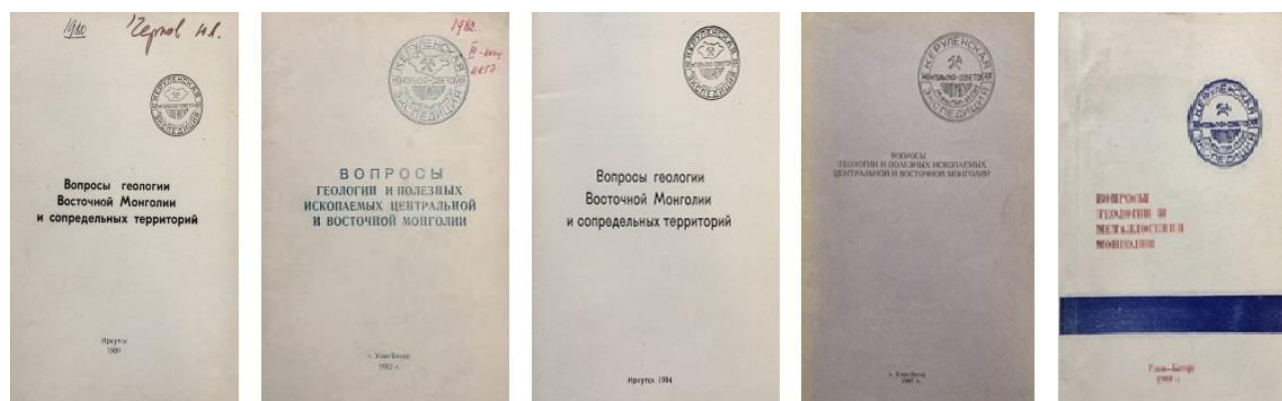


Рис. 4. Сборники научных трудов Керуленской международной геологической экспедиции 1980, 1982, 1984, 1987 и 1989 гг.

Fig. 4. Collections of scientific papers of the Kerulen International Geological Expedition of 1980, 1982, 1984, 1987 and 1989



Рис. 5. Тезисы докладов Керуленской международной геологической экспедиции 1993, 1995, 2001, 2004, 2005, 2009 и 2019 гг.

Fig. 5. Report abstracts of the Kerulen International Geological Expedition 1993, 1995, 2001, 2004, 2005, 2009 and 2019

Опыт, приобретенный в процессе работы КМГЭ, послужил основой для дальнейших проектов, успешно осуществленных в Монгольском государственном университете науки и технологии. Это проекты ТЕМПУС-ТАСИС (англ.: TEMPUS, Trans-European Mobility Scheme for University Studies; TACIS, Technical Assistance for Commonwealth of Independent States), финансируемые Европейским Союзом, Канадским агентством международного развития, а также международные проекты, возглавляемые Геологической службой Соединенных Штатов Америки, Международной программой геологических наук, двусторонние проекты с университетами и научными институтами Японии, России, Германии, Англии, США, Чехии и др.

Масштабность и значимость работ КМГЭ отражает простая статистика. За первые 15 лет по материалам ее полевых и научно-исследовательских работ защищено 23 диссертации (из них 7 докторских и 16 кандидатских), опубликовано около 415 печатных работ, в том числе 21 монография, 26 учебников и учебных пособий.

Подготовка научных трудов способствовала творческому росту целого ряда молодых

преподавателей, защитивших по результатам проведенных работ в разных учебных заведениях 9 кандидатских диссертаций: Ж. Ган-Очир (1975), С. Дашдаваа (1975), Ч. Сэрэготов (1983), В. Балжинням (1983), Д. Дугараа (1984), Я. Болд (1985), Д. Чулуун (1988), С. Дандар (1990) и Г. Ухнаа (1990). Докторскую диссертацию успешно защитила в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО АН СССР О. Гэрэл.

Результаты исследований КМГЭ освещались в качестве докладов на международных конференциях, симпозиумах и геологических конгрессах. Тексты докладов публиковались в трудах ИрГТУ, МонГУ, международных геохимических симпозиумов, международных геологических конгрессов, международных конференций России, Монголии, Китая, Японии, Чехии, Словакии, Намибии, Германии, Англии.

Разнообразие тематики докладов по различным направлениям геологии показывает значительное расширение круга интересов участвующих сторон, привлечение большого количества молодых исследователей, а главное – стремление к продолжению долгосрочного партнерского сотрудничества в геологоразведочной отрасли, включая и подготовку достойных профессиональных кадров.



В 2006 году решением XV конференции КМГЭ в программу работ был включен еще один проект – «Нефтегазоносные геологические системы Центральной Азии» (руководитель профессор Л.А. Рапацкая). По результатам работы над проектом сотрудниками ИргТУ были опубликованы десятки статей и монография в соавторстве с ректором Хэбэйского геологического института Хао Дун Хэном на русском и китайском языках (рис. 6) [13]. При написании монографии были использованы материалы работ китайских исследователей [14, 15].

Профессора ИПИ А.Н. Иванов и Л.А. Рапацкая в 1977–1979 годах вели преподавательскую и научно-исследовательскую деятельность на геологическом факультете Монгольского технического университета. Профессора Г.С. Вахрамеев, Ж.В. Семинский, В.М. Степанов читали там курсы лекций по проблемам региональной геологии, структурной геологии, металлогении, геофизическим методам исследований, геологии месторождений полезных ископаемых, геологическому картированию и геохимии. Ученые Монгольского технического университета О. Гэрэл, В. Бал-

жиням, П. Дугараа, Ш. Батжаргал, в свою очередь, преподавали в ИПИ.

Кроме статей и монографий в результате работы КМГЭ был издан ряд учебников и учебных пособий^{2,3} [16–18].

Результаты исследования их обсуждение

На пленарном заседании, посвященном 40-летию юбилею КМГЭ, исполняющий обязанности ректора ИРНИТУ А.А. Афанасьев отметил: «Значение данной экспедиции трудно переоценить. Уникальная форма взаимодействия науки России, Китая и Монголии в рамках Керуленской международной геологической экспедиции получила конкретные результаты как в теоретическом, так и практическом плане». И это действительно так. В результате работы КМГЭ территория Монголии была покрыта геологической съемкой масштаба 1:50000 и 1:200000 на площади 2500 км². Усилиями участников экспедиции были открыты крупные месторождения угля, флюорита, керамического сырья, а также ряд различных рудопроявлений. Основные итоги работ 9 хоздоговорных и 12 госбюджетных про-



Рис. 6. Монография «Нефтегазоносные комплексы восточных регионов России и Китая», выполненная по результатам работы над одним из проектов Керуленской международной геологической экспедиции, 2011 г.

Fig. 6. Monograph "Oil and gas complexes of the eastern regions of Russia and China" based on the results of one of the projects of the Kerulen International Geological Expedition, 2011

² Иньшин Е.Д., Иванов А. Н., Дашдаваа С., Батжаргал Ш. Месторождения металлических полезных ископаемых: учеб. пособие. Иркутск: ИГУ, 1992. 174 с.

³ Рапацкая Л.А. Общегеологические термины и понятия: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1986. 84 с.



ектов отражены в 18 научных и 9 производственных отчетах. Успешно выполнена задача подготовки высококвалифицированных кадров: защищено 7 докторских и 16 кандидатских диссертаций. Опубликовано более 400 печатных работ, в том числе 8 монографий. Издан 21 сборник трудов. Результаты исследований КМГЭ регулярно освещались на научных конференциях, в которых помимо преподавателей российских и монгольских вузов принимали участие ведущие ученые Монголии и России: академики Б. Лувсанданзан, О. Томуртоого. Ф.А. Летников, Л.В. Таусон.

Заключение

Правительство России и Монголии дало высокую оценку работе КМГЭ, наградив большую группу специалистов экспедиции, в том

числе ряд профессоров ИПИ (ИрГРУ, ИР-НИТУ), орденами и медалями. А.Н. Иванов награжден орденом «Знак Почета». С.Б. Леонову, Г.С. Вахромееву, Ю.А. Чернову, А.Н. Иванову, Л.А. Рапацкой было присвоено высокое звание «Почетный профессор Монгольского технического университета». За высокие заслуги в развитии образования, воспитании молодого поколения орденом учительской славы «Золотая фортуна» награждены Ю.А. Чернов, Ж.В. Семинский и Л.А. Рапацкая. Директору Минералогического музея ИрГТУ Л.Д. Вахромеевой вручен орден «Подвиг учителя». Кроме того, Ю.А. Чернов награжден медалями «Дружба», «60 лет МНР», знаками «Отличник образования МНР», «Почетный учитель МНР», «Почетный геолог МНР».

Список источников

1. Ганжуров В.Ц. Россия – Монголия (история, проблемы, современность). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1997. 181 с.
2. Арьянов А.Д. Монгольские студенты Иркутского политехнического института // Теоретические и прикладные вопросы науки и образования: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, 2013. Ч. 2. С. 10–11.
3. Арьянов А.Д., Жабаяева Л.Б. Формирование инженерно-технических и управленческих кадров Монголии в Иркутском государственном техническом университете (1960–1990-е гг.) // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2014. № 1. С. 158–162. <https://elibrary.ru/sdekoz>.
4. Фалилеева Н.В., Филин С.А., Дугаржав Л., Ерофеева И.А. Проблемы взаимодействия России и Монголии в сфере образования // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 12. С. 10–22. <https://elibrary.ru/pxbdkh>.
5. Иркутский государственный технический университет, 1930–2000 / авт.-сост. Н.Я. Хлебкова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. 398 с.
6. Арьянов А.Д. Подготовка инженерно-технических кадров Монголии в Иркутском государственном техническом университете (1960–1990-е гг.) // Военно-политическое, экономическое и культурное сотрудничество СССР и МНР в 1920–1940-е гг.: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию создания Отдельной Бурят-Монгольской Краснознаменной кавалерийской бригады. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2015. С. 206–214. <https://elibrary.ru/varhqx>.
7. Степанов В.М. Гидрогеологические структуры Забайкалья. М.: Недра, 1980. 177 с.
8. Гэрэл О., Иванов А.Н. Керуленская межвузовская геологическая экспедиция: 30 лет плодотворного сотрудничества // Геологи: сб. ст. Улан-Батор: Изд-во Монгольского университета науки и технологии, 2004. № 10. С. 3–5.
9. Жанчивланский редкометалльный гранитный массив в Центральной Монголии / отв. Ю.А. Чернов, Ж. Ган-Очир, Д. Чулуун. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1984. 112 с.
10. Иванов А.Н., Балжинням В. Тектоническая зональность Хэнтэй-Керуленской провинции гранитных пегматитов // Материалы IV конференции Керуленской международной геологической экспедиции. Иркутск, 1984. С. 16–20.
11. Рапацкая Л.А., Иванов Н.А. Русский язык в профессиональных вузах Китая в условиях рыночной экономики // Известия вузов Сибири. Серия наук о Земле. 2003. № 6-7. С. 3–5.
12. Гао Ф. Особенности обучения русскому языку в китайских вузах // Педагогическое образование в России. 2016. № 12. С. 41–45. <https://elibrary.ru/xrjsex>, <https://doi.org/10.26170/po16-12-07>.
13. Хао Д., Рапацкая Л.А., Иванов А.Н., Буглов Н.А. Хэ Х. Нефтегазовые комплексы восточных регионов России и Китая. Пекин: Изд-во геологии, 2011. 248 с.
14. Цзинь Ч. Закономерности строения и размещения средних и крупных нефтегазовых месторождений Китая // Геология нефти и газа. 2007. № 1. С. 46–54. <https://elibrary.ru/jwolsf>.
15. Чэнь С. Фильтрационно-емкостные свойства палеогеновых коллекторов во впадине Дунин (бассейн Бохайского залива) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2007. № 4. С. 73–76. <https://elibrary.ru/ibqdeh>.
16. Иванов А.Н., Дашдаваа С., Батжаргал Ш. Месторождения металлических полезных ископаемых. Улан-Батор: Изд-во МонГУ, 1980. 133 с.
17. Иванов А.Н. Региональные магмогенерирующие геологические системы зрелой континентальной литосферы (геологическое моделирование и минерагения). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 176 с.
18. Страбыкин Н.Н., Перетолчин В.А., Хайдав А. Горные машины и комплексы. Улан-Батор, 1982. 346 с.



References

1. Ganzhurov V.Ts. Russia – Mongolia (history, challenges, the present time). Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre SB RAS; 1997. 181 p. (In Russ.).
2. Aryanov A.D. Mongolian students of Irkutsk Polytechnic Institute. In: *Teoreticheskie i prikladnye voprosy nauki i obrazovaniya: sb. nauch. tr. po materialam mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Theoretical and applied issues of science and education: collected scientific papers based on the materials of the International scientific and practical conference*. Tambov; 2013, pt. 2, p. 10–11. (In Russ.).
3. Aryanov A.D., Zhabaeva L.B. Formation of engineering, technical and administrative personnel of Mongolia at Irkutsk State Technical University (1960–1990th). *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya = The Bulletin of East Siberia State University of Technology and Management*. 2014;1: 158-162. (In Russ.). <https://elibrary.ru/sdekox>.
4. Falileeva N.V., Filin S.A., Dugarzhav L., Erofeeva I.A. Russia-Mongolia interaction issues in the field of education. *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost' = National Interests: Priorities and Security*. 2013;12:10-22. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pxbdkh>.
5. Khlebkova N.Ya. *Irkutsk State Technical University, 1930–2000*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000. 398 p. (In Russ.).
6. Aryanov A.D. Training of Mongolian engineering and technical personnel at the Irkutsk State Technical University (1960–1990s). In: *Voenno-politicheskoe, ekonomicheskoe i kul'turnoe sotrudnichestvo SSSR i MNR v 1920–1940-e gg.: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 90-letiyu sozdaniya Otdel'noi Buryat-Mongol'skoi Krasnoznamennoi kavaleriiskoi brigady = Military-political, economic and cultural cooperation between the USSR and the MPR in the 1920s–1940s: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the creation of a Separate Buryat-Mongolian Red Banner Cavalry Brigade*. Ulan-Ude: Banzarov Buryat State University; 2015, p. 206–214. <https://elibrary.ru/varhqx>.
7. Stepanov V.M. *Transbaikalian hydrogeological structures*. Moscow: Nedra; 1980. 177 p. (In Russ.).
8. Gerel O., Ivanov A.N. Kerulenskaya interuniversity geological expedition: 30 years of fruitful cooperation. In: *Geologi = Geologists*. Ulan-Bator: Mongolian University of Science and Technology; 2004, iss. 10, p. 3–5. (In Russ.).
9. Chernov Yu.A., Gan-Ochir Zh., Chuluun D. *Zhanchi-vlan rare-metal granite massif of Central Mongolia*. Irkutsk: Irkutsk State University; 1984. 112 s. (In Russ.).
10. Ivanov A.N., Balzhinnyam V. Tectonic zoning of the Khentei-Kerulen province of granite pegmatites. In: *Materialy IV konferentsii Kerulenskoi mezhdunarodnoi geologicheskoi ekspeditsii = Materials of the 4th Conference of the Kerulen International Geological Expedition*. Irkutsk; 1984, p. 16–20. (In Russ.).
11. Rapatskaya L.A., Ivanov N.A. The Russian language in professional universities of China in market economy. *Izvestiya vuzov Sibiri. Seriya nauk o Zemle*. 2003;6-7: 3-5. (In Russ.).
12. Gao F. Teaching Russian in Chinese universities. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii = Pedagogical Education in Russia*. 2016;12:41-45. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xrjsex>, <https://doi.org/10.26170/po16-12-07>.
13. Hao D., Rapatskaya L.A., Ivanov A.N., Buglov N.A. He H. *Oil and gas complexes of the eastern regions of Russia and China*. Pekin: Izd-vo geologii; 2011. 248 p. (In Russ.).
14. Tszin Ch. Structural and distribution regularities of medium and large fields in china. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil And Gas Geology*. 2007;1:46-54. (In Russ.). <https://elibrary.ru/jwolsf>.
15. Chen X. Reservoir properties of Paleogene reservoirs in the Duning basin (Bohai Bay basin). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2007;4:73-76. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ibqdeh>.
16. Ivanov A.N., Dashdavaa S., Batjargal Sh. *Deposits of metallic minerals*. Ulan-Bator: National University of Mongolia; 1980. 133 p. (In Russ.).
17. Ivanov A.N. *Regional magma-generating geological systems of the mature continental lithosphere (geological modeling and minerageny)*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007. 176 p. (In Russ.).
18. Strabykin N.N., Peretolchin V.A., Khaidav A. *Mining machines and complexes*. Ulan-Bator; 1982. 346 p. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Рапацкая Лариса Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
профессор кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ raplarisa@yandex.ru
Larisa A. Rapatskaya,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ raplarisa@yandex.ru

**Вклад автора / Contribution of the author**

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 11.04.2023; принята к публикации 27.04.2023.

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 11.04.2023; accepted for publication 27.04.2023.



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 специальностям:

- 1.6.9. Геофизика (технические науки);
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки);
- 2.8.1. Технология и техника геолого-разведочных работ (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

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; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию; акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG / 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 – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. В журнал принимаются статьи трех типов:

Научная статья. Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной обла-



сти. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов.

Обзорная статья. Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов.

Краткое сообщение. Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

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, 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 Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение». 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 170×245 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.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG / JPEG (сохранение в формате PNG / JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

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, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперIODических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) 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 подрисуночные 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.

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. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

Главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: sarhin@geo.istu.edu.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Е-219.



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 данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также 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-серицитовый 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

Финансирование:

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 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

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Курчевская Елена Михайловна,

старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Elena M. Kurchevskaya,

Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Яхно Марина Владиславовна,

старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Marina V. Yakhno,

Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Сенченко Аркадий Евгеньевич,

генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

Arkady E. Senchenko,

CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 46 № 2 (83) 2023

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 29.06.2023 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,75.
Тираж 500 экз. Зак. 59. Поз. плана 4н

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а

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