

ISSN 2686-9993 (print)

ISSN 2686-7931 (online)

12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 45 № 2 2022

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

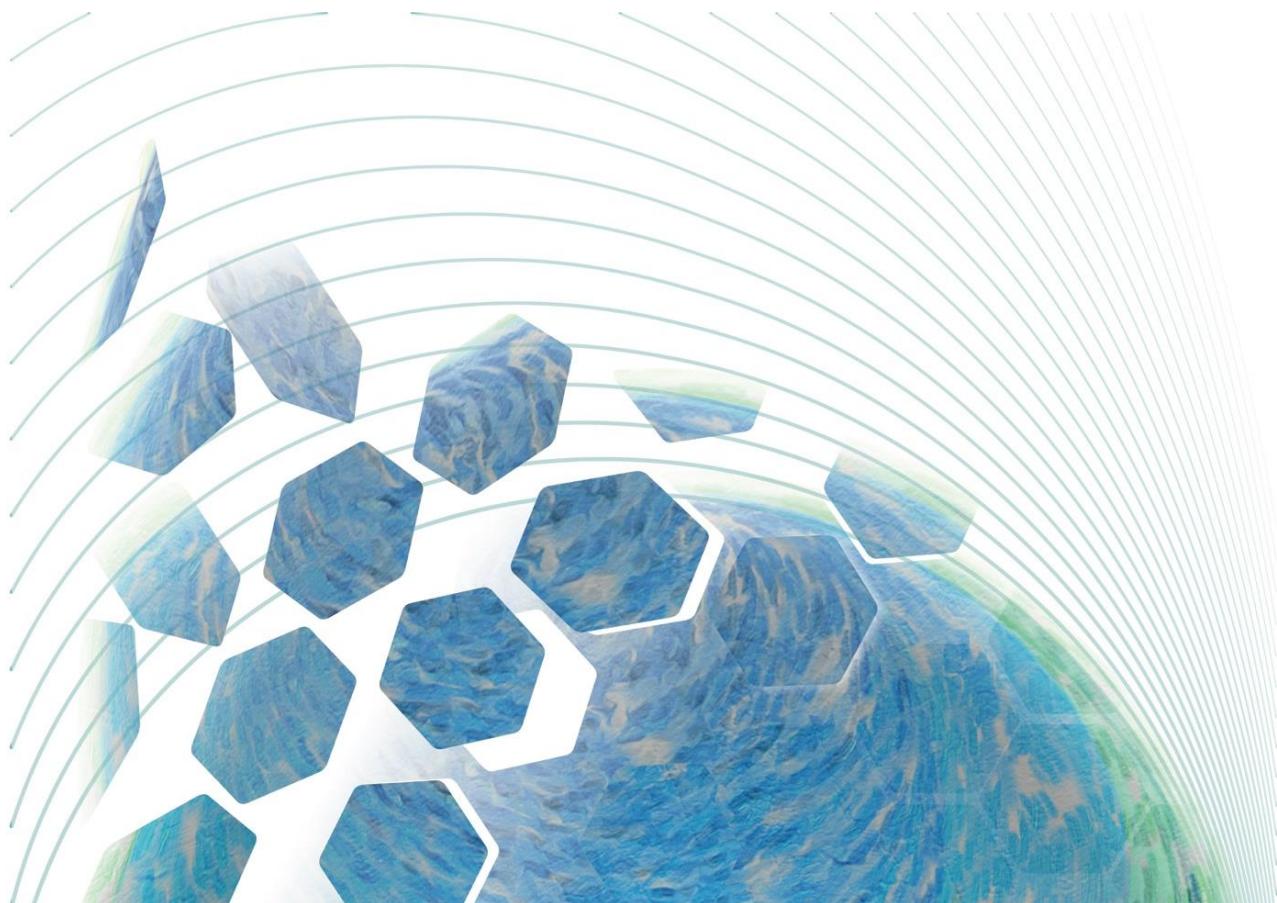
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 45 № 2 2022

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

Председатель редакционного совета:

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

Журнал «Науки о Земле и недропользование» **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, рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAII, 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», 2022

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Chairman of the Editorial Council

Seminsky Zh. V., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editors-in-Chief

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

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

Executive secretary

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

The journal "Earth sciences and subsoil use" is 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, OAII (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', 2022



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	100
Колонка главного редактора.....	102
Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых	
Избродина С. Ю., Порохов В. Ф. Изотопный состав кислорода борных минералов из курчатовит-сахаитовых руд месторождения Солонго.....	104
Харитонов А. Л. Результаты геолого-геофизического исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, их связь с месторождениями полезных ископаемых.....	119
Мурзина Е. В., Поспев А. В., Семинский И. К., Буддо И. В., Немцева Д. Б., Емельянов В. С., Агафонов Ю. А. Особенности инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопоисковых исследованиях на территории Непско-Ботуобинской антеклизы.....	137
Рапацкая Л. А., Карпиков А. В. Литолого-фациальная изменчивость ярактинского горизонта как комплексный результат геодинамических процессов тектоногенеза и седиментогенеза.....	152
Обогащение и переработка полезных ископаемых	
Федотов П. К., Бурдонов А. Е., Новиков Ю. В., Терентьев Н. В., Богданюк И. О. Исследование переработки руд золоторудного месторождения флотационными методами.....	162
Гидрогеология и инженерная геология	
Аузина Л. И. Прогноз подъема уровня грунтовых вод в районе исторических построек города Иркутска.....	172
Теняков Е. О., Савельев Е. А., Данилова М. А. Доразведка Верхнечонского месторождения технических подземных вод: новые методы изучения и результаты.....	184
Рященко Т. Г., Маслов Е. А., Брыжак Е. В., Корнилова Т. А., Вашестюк Ю. В., Болотнев А. Ю. Инженерно-геологическая оценка скальных грунтов на примере анализа коллекции образцов Албазинского месторождения.....	197
К сведению авторов.....	211



CONTENTS

Contents.....	101
Chief Editor's Column.....	103

Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Izbrodina S. Yu., Posokhov V. F. Oxygen isotopic composition of boron minerals from kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo deposit.....	104
Kharitonov A. L. Results of geological and geophysical study of the deep structure of Angara and Trans-Baikal mantle plumes and their connection with mineral deposits.....	119
Murzina E. V., Pospeev A. V., Seminskiy I. K., Budko I. V., Nemtseva D. B., Emelianov V. S., Agafonov Y. A. Features of high-density transient electromagnetic sounding data inversion under oil and gas prospecting in the Nepa-Botuoba anteclide area.....	137
Rapatskaya L. A., Karpikov A. V. Lithofacies variability of the Yarakta horizon as a complex result of geodynamic processes of tectonogenesis and sedimentogenesis.....	152

Beneficiation and Processing of Minerals

Fedotov P. K., Burdonov A. E., Novikov Yu. V., Terentiev N. V., Bogdanyuk I. O. Study of gold ore processing by flotation methods.....	162
--	-----

Hydrogeology and Engineering Geology

Auzina L. I. Forecasting groundwater rise in the historic downtown area of Irkutsk city.....	172
Tenyakov E. O., Saveliev E. A., Danilova M. A. Further exploration of the Verkhnechonskoye field of technical groundwater: new research methods and results.....	184
Ryashchenko T. G., Maslov E. A., Bryzhak E. V., Kornilova T. A., Vashestyuk Y. V., Bolotnev A. Yu. Engineering-geological assessment of rocky soils based on the analysis of the collection of Albazinskoye deposit samples.....	197
Information for the Authors.....	211



Слово редактора



Добрый день, дорогие авторы и читатели нашего журнала!

Перед вами очередной выпуск, посвященный, как обычно, различным аспектам изучения недр Сибирского региона. Так сложилось, что все статьи этого номера журнала имеют отчетливую практическую направленность вне зависимости от того, посвящены ли они методам переработки руд золоторудных месторождений либо геохимическим, геолого-геофизическим, инженерно-геологическим или гидрогеологическим проблемам, в отличие от многих прежних выпусков, где не оставались без внимания и чисто теоретические вопросы, нередко глобального характера. В то же время, как это обычно бывает в геологии, представленные работы

не ограничиваются изложением фактического материала. Их авторы, проводя всесторонний анализ, глубоко вникают в причинно-следственные связи изучаемых структур и явлений, что позволяет переходить к прогнозным оценкам. Так, статья А. Л. Харитонова, направленная на сравнительный анализ геолого-геофизических особенностей Ангарского и Забайкальского мантийных плутонов, выходит на их связь с региональными месторождениями полезных ископаемых. Л. И. Аузина, анализируя динамику грунтовых вод в пределах исторической застройки города Иркутска, прогнозирует их возможный подъем во вполне обозримой перспективе. Причинно-следственные связи литолого-фациальной изменчивости продуктивных горизонтов и геодинамических процессов тектогенеза и седиментогенеза рассмотрены в статье Л. А. Рапацкой и А. В. Карпикова. Новым методам драгоценности месторождений подземных вод посвящена статья Е. О. Тенякова и его соавторов, анализ результатов электромагнитных инверсий при нефтегазопоисковых исследованиях проведен большим коллективом геофизиков во главе с Е. В. Мурзиной. Наши авторы стремятся к расширению аудитории своих читателей и предлагают к публикации статьи не только на русском, но и на английском языке, как это сделали Л. И. Аузина и П. К. Федотов со своими соавторами. На взгляд редакционной коллегии, отбирающей статьи для публикации, номер получился содержательным и интересным.

Впереди лето – для геологов это самое продуктивное время полевых экспедиций, сбора материала, время новых открытий, реализации планов, намеченных предыдущими исследованиями. Желаем всем огромных успехов и ждем от вас свежих идей, прогнозов, глубокой аналитики и статей на благо дальнейшего развития геологической науки в Сибири.

**Раиса Моисеевна Лобацкая,
главный редактор**



From the Editor

Dear authors and readers of our journal,

We are glad to introduce you a new issue traditionally dedicated to various aspects of the subsoil study in the Siberian region. All the articles in this issue of the journal are focused on the practical application regardless of whether they are devoted to the processing methods of ores of gold deposits or geochemical, geophysical, engineering-geological or hydrogeological problems unlike many previous issues dealing also with purely theoretical issues, often of a global nature. At the same time, as is typically the case in geology, the introduced researches are not limited to presenting factual material only. Providing a comprehensive analysis, the authors examine and consider the cause-and-effect relationships of the studied structures and phenomena, which is followed by predictive estimates. Thus, the article by A. L. Kharitonov dealing with the comparative analysis of the geological and geochemical features of the Angarsk and Transbaikal mantle plumes concludes on their connection with regional mineral deposits. L. I. Auzina having analyzed groundwater dynamics within the historical sites of the city of Irkutsk, predicts possible rise of groundwater in the foreseeable future. The cause-and-effect relationships of lithofacies variability of productive horizons and geodynamic processes of tectogenesis and sedimentogenesis are considered in the article by L. A. Rapatskaya and A. V. Karrikov. The article by E. O. Tenyakov and his co-authors is devoted to the new methods of further exploration of groundwater deposits. The analysis of the results of electromagnetic inversions under oil and gas exploration was conducted by a large team of geophysicists headed by E. V. Murzina. Our authors strive to expand the audience of their readers and publish articles not only in Russian, but also in English, as was done by L. I. Auzina, P. K. Fedotov and his co-authors. From the point of view of the editorial board engaged in the selection of articles for publication the issue is informative and interesting.

Summer is coming. It is the most advantageous time of field expeditions, collection of material. It is the time of new discoveries and implementation of plans outlined by previous studies. We wish everyone great success and look forward to your fresh ideas, forecasts, in-depth analysis and articles for the benefit of the further development of geological science in Siberia.

Raisa Lobatskaya,
The Editor-in-Chief



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 553.637

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-104-118>



Изотопный состав кислорода борных минералов из курчатовит-сахаитовых руд месторождения Солонго

Светлана Юрьевна Избродина^a, Виктор Федорович Посохов^b

^{a,b}Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Автор, ответственный за переписку: Избродина Светлана Юрьевна, izbrodina@mail.ru

Резюме. Борно-магнетитовое скарновое месторождение Солонго (Западное Забайкалье, Россия) обладает промышленными запасами редких курчатовит-сахаитовых руд. Целью данной работы являлось изучение изотопного состава кислорода борных минералов из курчатовит-сахаитовых руд месторождения. Исследование образцов проводилось с помощью современных методов электронной микроскопии, масс-спектрометрии. На оригинальных фотоснимках прозрачных шлифов, изображениях образцов в обратно отраженных электронах приведены минеральные ассоциации сахаита и курчатовита: полиминеральный ссайбелийт-сибирскит-кальцитовый агрегат, роут, федоровскит, людвигит, форстерит, серпентин, титанит, сфалерит, магнетит, якобсит, апатит, турнорит. Приведена характеристика эволюции борных минералов на месторождении Солонго. Были получены следующие показатели изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ v-SMOW в минералах: в сахаите – +1 ‰, в роуте – +2,7 ‰, в курчатовите – +1,9 ‰, в магнетите – -0,3 ‰. В результате сравнения изотопных данных по сахаиту с уже имеющимися литературными данными обнаружено, что сахаит борных руд месторождения имеет относительно облегченный состав кислорода. Такие показатели могут объясняться участием метеорных вод, в том числе талых вод снежников и многолетней мерзлоты, в процессе формирования месторождения, а также пониженными показателями изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ доломитов Озернинского рудного узла, с преобразованием которых связывается формирование сахаита.

Ключевые слова: сахаит, курчатовит, эндогенные бораты, изотопы кислорода, магнезиальные скарны, Солонго, Озернинский рудный узел

Финансирование: Работы проводились в рамках базовой темы Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН. Номер государственной регистрации – АААА-А21-121011390003-9.

Благодарности: Работы выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ). Авторы выражают особую благодарность аналитику Е. А. Хромовой, а также огромную благодарность Г. И. Дорошкевичу, Г. С. Риппу и музею Бурятского научного центра СО РАН за предоставленные образцы.

Для цитирования: Избродина С. Ю., Посохов В. Ф. Изотопный состав кислорода борных минералов из курчатовит-сахаитовых руд месторождения Солонго // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 104–118.
<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-104-118>.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Oxygen isotopic composition of boron minerals from kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo deposit

Svetlana Yu. Izbrodina^a, Viktor F. Posokhov^b

^{a,b}Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Corresponding author: Svetlana Yu. Izbrodina, izbrodina@mail.ru

© Избродина С. Ю., Посохов В. Ф., 2022



Abstract. The Solongo boron-magnetite skarn deposit (Western Transbaikalia, Russia) features industrial reserves of rare kurchatovite-sakhaite ores. The purpose of the work is to study the oxygen isotopic composition of boron-bearing minerals from the kurchatovite-sakhaite ores of the deposit. The samples were studied using modern methods of electron microscopy, mass spectrometry. The original photographs of transparent thin sections and images of the samples in backscattered electrons show mineral associations of sakhaite and kurchatovite including polymineral szaibeliite-sibirskite-calcite aggregate, roweite, fedorovskite, ludwigite, forsterite, serpentine, titanite, sphalerite, magnetite, jacobsite, apatite, turneau-reite. The evolution of the Solongo deposit boron minerals is described. The following indicators of the oxygen isotopic composition $\delta^{18}\text{O}$ v-SMOW in minerals have been obtained: sakhaite – +1 ‰, roweite – +2.7 ‰, kurchatovite – +1.9 ‰, magnetite – -0.3 ‰. The comparison of isotopic data on sakhaite with the available literature data has shown that the sakhaite of Solongo boron ores has a relatively light oxygen composition. The indicators obtained are attributed to the participation of meteoric waters including melt waters of firn basins and permafrost, in the formation process of the deposit, as well as reduced index of the oxygen isotope composition $\delta^{18}\text{O}$ of the dolomites of the Ozerninsky ore cluster, whose transformation is associated with the sakhaite formation.

Keywords: sakhaite, kurchatovite, endogenic borates, oxygen isotopes, magnesian skarns, Solongo, Ozerninsky ore cluster

Funding: The research was carried under the core theme of the Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. State registration number is AAAA-A21-121011390003-9.

Acknowledgements: The research works were conducted using the equipment of the Shared Research Facilities "Geospectrum" of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (Ulan-Ude). The authors pay special tribute to the analyst E. A. Khromova, acknowledge the assistance of G. I. Doroshkevich, G. S. Ripp and thank the museum of the Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for providing the samples.

For citation: Izbrodina S. Yu., Posokhov V. F. Oxygen isotopic composition of boron minerals from kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(2):104-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-104-118>.

Введение

Кальциево-магниевый борат курчатовит и карбонатборат сахаит являются типоморфными минералами для скарновых месторождений бора, в которых магнезиальные скарны подверглись известково-скарновому замещению. Сложность генезиса подобных месторождений определяется сочетанием процессов, сопутствующих скарнообразованию, и процессов, связанных с наложением более позднего метаморфизма и гидротерм, что приводит к формированию разнообразных, зачастую уникальных минералов и руд.

Такие месторождения часто являются комплексными, сочетающими борные руды с магнетитовой, оловянной, свинцово-цинковой, вольфрамовой минерализацией. Месторождение Солонго первоначально было открыто в 1960 году как «Магнетитовое» при проверке аэромагнитных аномалий, и только при дальнейшем исследовании здесь были обнаружены богатые курчатовит-сахаитовые борные руды. Оно является местом первой находки шести боросодержащих минералов: курчатовита $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Mn},\text{Fe}^{2+})[\text{B}_2\text{O}_5]$ [1], солонгоита $\text{Ca}_2\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_4\text{Cl}$ [2], федоровскита $\text{Ca}_2\text{Mg}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_6$ [3], гексагидроборита $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [4], ви-

тимита $\text{Ca}_6\text{B}_{14}\text{O}_{19}(\text{SO}_4)(\text{OH})_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ [5], бурятиита $\text{Ca}_3(\text{Si},\text{Fe}^{3+},\text{Al})\text{SO}_4\text{B}(\text{OH})_4(\text{OH},\text{O})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [6]. Активно изучавшееся в 60–70-х годах прошлого столетия, в настоящий момент месторождение является объектом для исследования с целью расширения существующих представлений о минеральном и изотопном составе борных минералов, условиях их образования и составе рудообразующих флюидов.

Месторождение Солонго находится в восточной части Озернинского рудного узла на юге Еравнинского района Республики Бурятия. Рудный узел представляет собой крупный останец палеозойской Удино-Витимской островодужной системы в поле развития гранитоидов Ангаро-Витимского батолита [7]. Здесь выявлено более 20 различных месторождений и рудопроявлений: в западной зоне распространены месторождения железа и полиметаллов, а в восточной – месторождения сфалеритовых, железных, борных, оловянных руд.

Месторождение расположено между пачками вулканогенных пород среднего и кислого состава и карбонатных пород – известняков и доломитов (рис. 1). Возраст пород оценивается как нижнепалеозойский¹. В центре место-

¹ Виноградов Б. К., Дорошкевич Л. С., Ковалевская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

рождения на дневную поверхность в виде штока выходит массив лейкократовых высококалиевых гранитов, абсолютный возраст кото-

рых по данным уран-свинцового метода (масс-спектрометрия с индуктивно связанный плазмой с лазерной абляцией) составляет

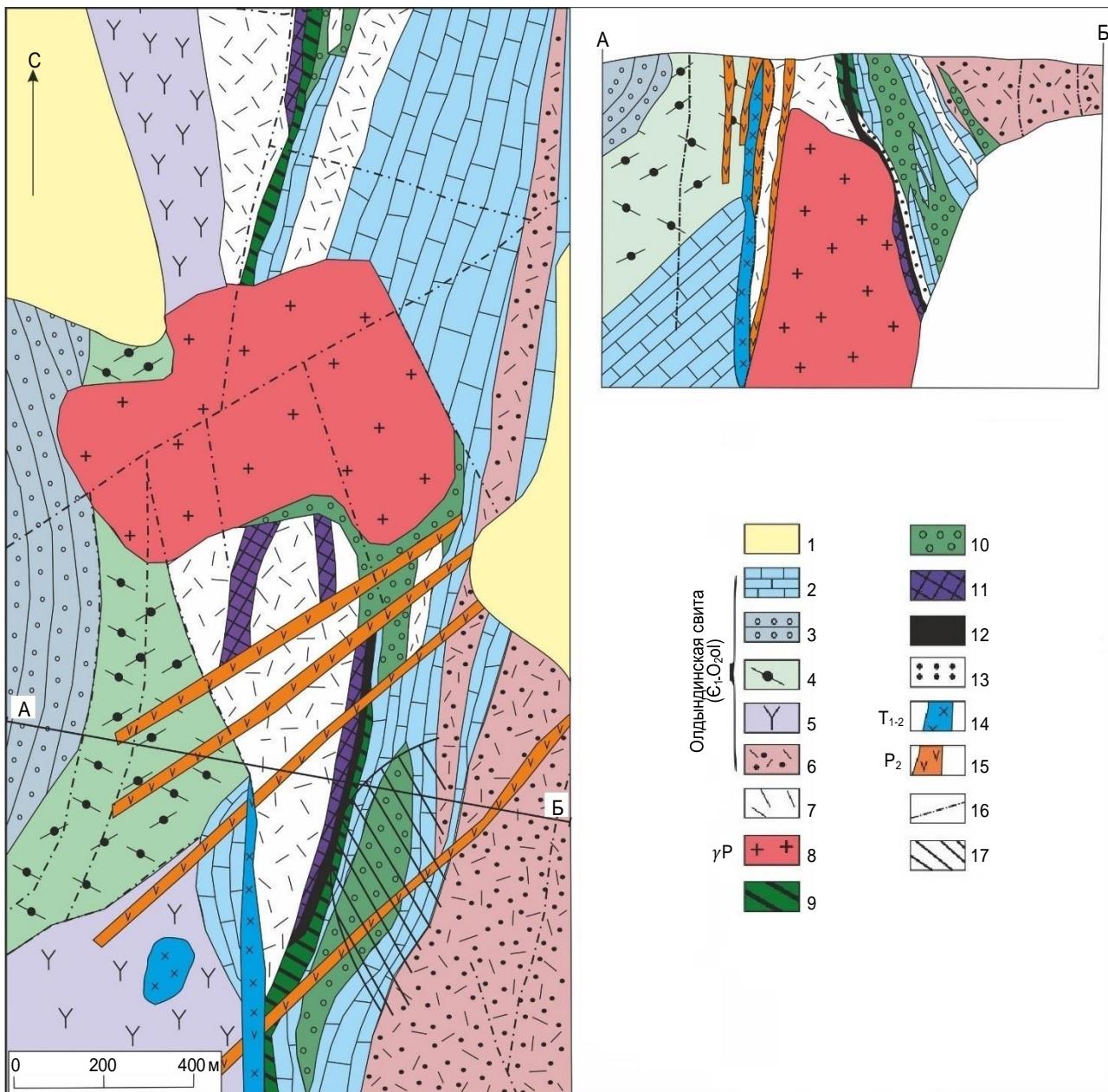


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и геологический разрез месторождения Солонго [9] (с изменениями авторов):
Олдычинская свита (C_1O_{201})

1 – четвертичные отложения; 2 – известняки мраморизованные; 3 – туфоалевролиты; 4 – туфы средних эффузивов; 5 – эффузивы среднего состава; 6 – туфы кислых эффузивов; 7 – ороговикованные эффузивы и роговики; 8 – лейкократовые граниты (Зазинский комплекс); 9 – кальцифиры; 10 – скарны известковые; 11 – руды магнетитовые с реликтами магнезиальных скарнов; 12 – руды людвигит-магнетитовые; 13 – руды сахаит-курчатовитовые; 14 – дайки долеритовых порфиритов; 15 – дайки граносиенит-порфириров; 16 – тектонические нарушения; 17 – проекция залежи сахаит-курчатовитовых руд на дневную поверхность

Fig. 1. Schematic geological map and a geological section of the Solongo deposit [9] (amended by the authors):

1 – Quaternary deposits; 2 – marmorized limestones; 3 – tuff siltstones; 4 – medium effusive tuffs; 5 – effusives of medium composition; 6 – acid volcanic tuffs; 7 – hornfelsed effusives and hornfels; 8 – leucocratic granites (Zazinsky complex); 9 – calciphyres; 10 – calcareous skarns; 11 – magnetite ores with magnesian skarn relicts; 12 – ludwigite-magnetite ores; 13 – sahaite-kurchatovite ores; 14 – dolerite porphyrite dikes; 15 – granosyenite-porphyry dikes; 16 – tectonic faults; 17 – projection of the sahaite-kurchatovite ore deposit on the daylight surface



287,1 ± 4,2 млн лет [8]. Гранитный массив относится к Зазинскому комплексу и входит в состав Ангаро-Витимского батолита. Содержание бора и урана в гранитах месторождения Солонго несколько повышены по сравнению с содержаниями этих элементов в близких частях Зазинского plutона. Интрузив вытянут в субмеридиональном направлении и формирует основание удлиненного гребневидного выступа в южной части месторождения, а в северной части круто погружается на глубину. Вдоль контакта с гранитной интрузией наблюдается ореол ороговикованных, скарнированных пород. Интрузивный магматизм проявлен на месторождении также дайками позднепалеозойских граносиенитов и мезозойских долеритов².

Скарнирование особенно проявлено в юго-восточной части месторождения. Магнезиальные скарны характеризуются клиногумитовым, форстеритовым, пироксен-форстеритовым, форстерит-флогопитовым составом. В настоящее время они представлены реликтами и практически полностью замещены известковыми скарнами и магнетитом. Замещение известковыми скарнами выражается в развитии пироксена, граната, везувиана по магнезиально-скарновым породам. Датировка флогопита из магнезиальных скарнов, проведенная калий-argonовым методом, выявила широкий диапазон значений (155–337 млн лет), что не позволяет однозначно трактовать время их формирования³. К магнезиально-скарновой зоне со стороны карбонатных пород примыкает зона кальцифиров. Известковые скарны широко развиты на месторождении в виде линзо- и пластообразных тел в зоне переслаивания карбонатных и эффузивных пород, имеют преимущественно пироксен-гранат-везувиановый состав.

Кроме ороговикования и скарновых процессов на месторождении отмечаются признаки более низкотемпературных метасоматических процессов, в частности грейзенизации, пропилитизации, окварцевания.

Наиболее широко представлена на месторождении магнетитовая минерализация, приуроченная большей частью к магнезиальным скарнам и эффузивам. Магнетитовые руды представлены несколькими линзо- и пластообразными телами, отличающимися по минеральному составу и содержанию железа (от 20 до 60 %). Сфалеритовое оруденение распространено в известняках, скарнах и кальцифирах, но представлено бедными рудами. В грейзенах локализуется молибденовая, вольфрамовая и оловянная минерализация. Основную ценность месторождения представляют борные руды.

Борные руды Солонго расположены в магнезиальных и известковых скарнах, а также в кальцифирах, которые примыкают к магнезиально-скарновой зоне со стороны карбонатных пород. Уникальное разнообразие минералов бора объясняется тем, что на месторождении развиты магнезиальные скарны, известковые скарны, а также известковые скарны, развитые с замещением магнезиальных (апомагнезиальные). Соответственно, развиты три минеральных типа эндогенного борного оруденения⁴ [10]:

1. Железо-магниевые (людвигит, варвикит) и магниевые (суанит, ссайбелиит, котоит, флюоборит) бораты, характерные для кальцифиров и магнезиальных скарнов. Борная минерализация данного типа на Солонго достаточно распространена, локализуется в кальцифирах, прилегающих к магнетитовым рудам.

2. Боросиликаты, характерные для известковых скарнов (датолит). Минерализация этого типа на Солонго отмечается в гранат-веzuвиановых скарнах и не имеет практического значения.

3. Специфический типоморфный комплекс кальциево-магниевых боратов (курчатовит, клинокурчатовит, бораты серии роута-федоровскита), карбонатоборатов (сахаит, боркарит) и кальциевых боратов (фроловит, сибирискит, вимсит, пентагидроборит, солонгойит,

² Виноградов Б. К., Дорошевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

³ Малинко С. В. Вещественный состав и условия образования боратовой минерализации, генетически связанной с известковыми скарнами. М.: Изд-во ВИМС, 1970. 259 с.

⁴ Там же.



гексагидроборит), характерный для апомагнезиальных скарнов. Скарны данного типа образуют линзовидную залежь мощностью до 10 м с простиранием и падением не менее чем 600 м, которая приурочена к внешним частям магнезиально-скарновых зон и кальцифирам. Уникальность состава борной минерализации третьего типа определяется присутствием в ассоциации железо-магниевых, магниевых, кальциевых, магниево-кальциевых и магниево-марганцево-кальциевых боратов. Несмотря на неравномерное распределение различных боратов, выделяют курчатовит-сахайтовый и людвигит-сахайтовый типы руд. При этом первые являются более богатыми и содержат от 5 до 26 % борного ангидрида [10].

Курчатовит $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}^{2+})[\text{B}_2\text{O}_5]$ представляет собой кальциево-магниевый аналог суанита. Следует отметить, что выделения курчатовита и его модульного полиморфа – клинокурчатовита – известны на месторождениях России (Титовское, Тас-Хаяхтах, Ново-Фроловское Турбинского рудного поля), Казахстана (Саяк-IV), Японии (рудник «Фука» в префектуре Окаяма), Афганистана (Гбаргей) [11, 12].

Сахайт $\text{Ca}_{12}\text{Mg}_4[\text{Cl}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_4(\text{BO}_3)_7]$ – карбонато-борат кальция и магния – является менее распространенным минералом. Он образует изоморфную серию с харкеритом $\text{Ca}_{12}\text{Mg}_4\text{Al}(\text{CO}_3)_5(\text{BO}_3)_3(\text{SiO}_4)_4\text{H}_2\text{O}$, в котором позиции $[\text{BO}_3]^{3-}$ изоморфно замещаются пентамером $\{\text{Al } [\text{SiO}_4]\}_4^{13-}$ и частично ионами Cl^- и OH^- . Кроме месторождения Солонго, расположенного в Бурятии, тела сахайтовых пород были обнаружены на месторождениях и рудо-проявлениях Эфкачан, Чыбагалах Селенняхского кряжа и Снежное, Керел, Докучан, Титовское (участки Моральный, Лагерный, Лю-Лю) хребта Тас-Хаяхтах, входящих в систему хребта Черского (Якутия), а также на месторождениях Саяк-IV (Казахстан) и Килигин (Китай)⁵ [13].

В данной статье представлены результаты изучения изотопного состава кислорода для курчатовит-сахайтовых руд месторождения Солонго.

⁵Малинко С. В., Халтурина И. И., Озол А. А., Бочаров В. М. Минералы бора: справочник. М.: Недра, 1991. 231 с.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования был проведен анализ образцов борных руд с месторождения Солонго. Некоторые из них представляют собой части керна из скважины 32б, другие не имеют четкой привязки.

Аналитические данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ). Образцы пород и руд исследовалась в прозрачных шлифах и аншлифах с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51. Микроструктурные особенности, взаимоотношения минералов исследованы на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионной приставкой для количественного анализа Inca-Energy. Измерения изотопного состава кислорода выполнялись в виде O_2 на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт – образец). Подготовка образцов для определения величин $\delta^{18}\text{O}$ проводилась с использованием метода лазерного фторирования на опции «лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов» в присутствии в качестве реагента пентафторида брома по методу, описанному в статье [14]. Для изотопного анализа кислорода использовались только чистые минералы (в виде осколков) общим весом 1,5–2,5 мг. Расчеты $\delta^{18}\text{O}$ были выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Правильность полученных значений контролировалась регулярными измерениями собственного внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного стандарта Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва) Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин $\delta^{18}\text{O}$ находилась на уровне $(1s) \pm 0,2 \text{ ‰}$.

Для идентификации борных минералов был проведен рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре D8 Advance фирмы BRUKER AXS (Германия): СиКа-излу-

чение, $2\theta = 10-70^\circ$, выдержка – 0,1 с в точке, шаг $\sim 0,021^\circ$, детектор Vantec-1. На данном этапе было использовано оборудование Центра коллективного пользования Байкальского института природопользования СО РАН (г. Улан-Удэ).

Результаты исследования и их обсуждение

В статье представлены результаты исследования образцов курчатовит-сахаитовой руды месторождения Солонго. Макроскопически сахаит-курчатовитовые руды представляют собой серые или буровато-зеленые породы. Образцы имеют преимущественно сахаитовый состав с содержанием минерала 50–60 %. В меньшем объеме наблюдается курчатовит (до 15–30 %). В переменных количествах наблюдаются ссайбелиит, сибирскит, кальцит, титанит, якосит, сфалерит, форстерит, людвигит, роут, пентагидроборит.

Сахаит образует мелкозернистую массу оливково-зеленого цвета. Единичные зерна

бесцветные и прозрачные, блеск стеклянный вплоть до слабожирного. Излом раковистый. В шлифах минерал легко идентифицируется благодаря изотропности (рис. 2, а). При анализе образца на электронном микроскопе было определено, что сахаит содержит небольшое количество кремния (SiO_2 от 1,45 до 3,59 масс. %), железа (1,76–2,17 масс. %) и марганца (0,52–0,85 масс. %).

Курчатовит образует изометричные зерна размером от нескольких долей миллиметра до 2 см в длину светло-серого цвета. В шлифе характерны яркие от сине-зеленого до малинового цвета интерференции (см. рис. 2, а, е). Зерна курчатовита часто трещиноватые, имеют корродированные границы, а также покрыты сетью мелких (от сотых до десятых долей миллиметра) прожилков вторичных борных минералов. Минерал наиболее часто образует тесные срастания с сахаитом (см. рис. 2, а, е; рис. 3, а, б). Наблюдаются замещение курчатовита сахаитом, в сахаите остаются мирмекитовые реликтовые включения курча-

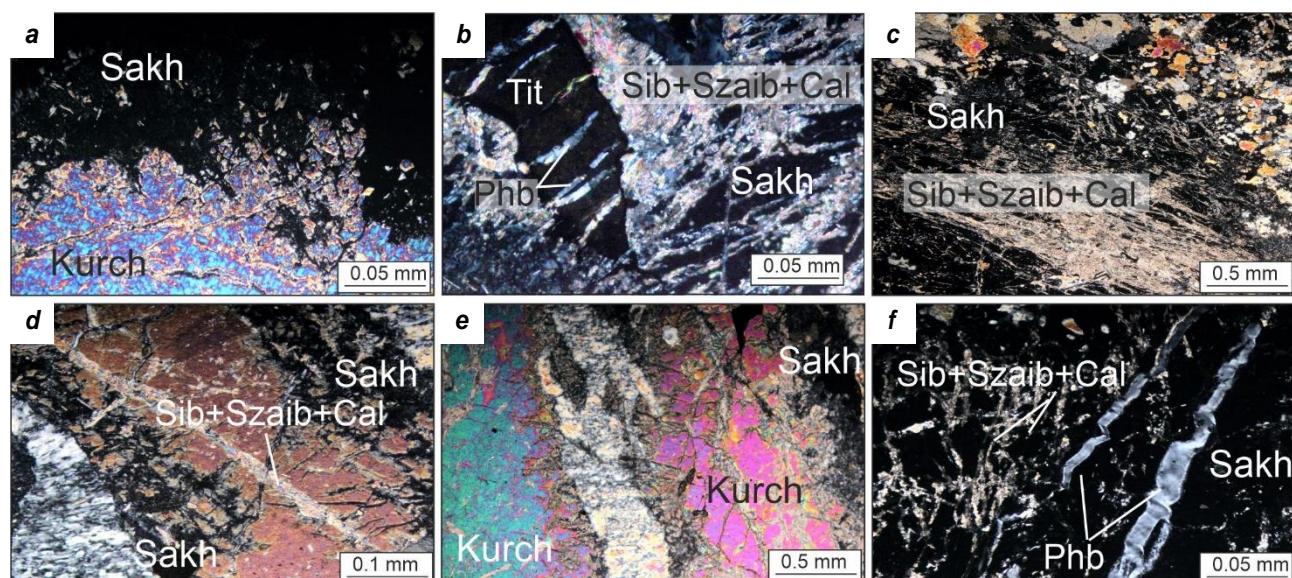


Рис. 2. Петрографические особенности и взаимоотношения минералов курчатовит-сахаитовых руд месторождения Солонго (фотографии прозрачных шлифов, перекрестно поляризованный свет):

а – взаимоотношения курчатовита и сахаита; б, с – замещение сахаита сибирскит-ссайбелиит-кальцитовым агрегатом; д – сибирскит-ссайбелиит-кальцитовый прожилок в курчатовите; е – курчатовит, секущийся прожилком вторичного борного минерала; ф – прожилки пентагидроборита в сахаитовой породе, замещаемой полиминеральным агрегатом
Sakh – сахаит; Kurch – курчатовит; Sib – сибирскит; Szaib – ссайбелиит; Cal – кальцит; Phb – пентагидроборит

Fig. 2. Petrographic features and relationships of kurchatovite-sakhaite ore minerals of the Solongo deposit (images of transparent thin sections under the cross polarized light):

а – курчатовит и сахаит; б, с – замещение сахаита сибирскит-ссайбелиит-кальцитовым агрегатом; д – сибирскит-ссайбелиит-кальцитовый прожилок в курчатовите; е – курчатовит, секущийся прожилком вторичного борного минерала; ф – прожилки пентагидроборита в сахаитовой породе, замещаемой полиминеральным агрегатом
Sakh – сахаит; Kurch – курчатовит; Sib – сибирскит; Szaib – ссайбелиит; Cal – кальцит; Phb – пентагидроборит

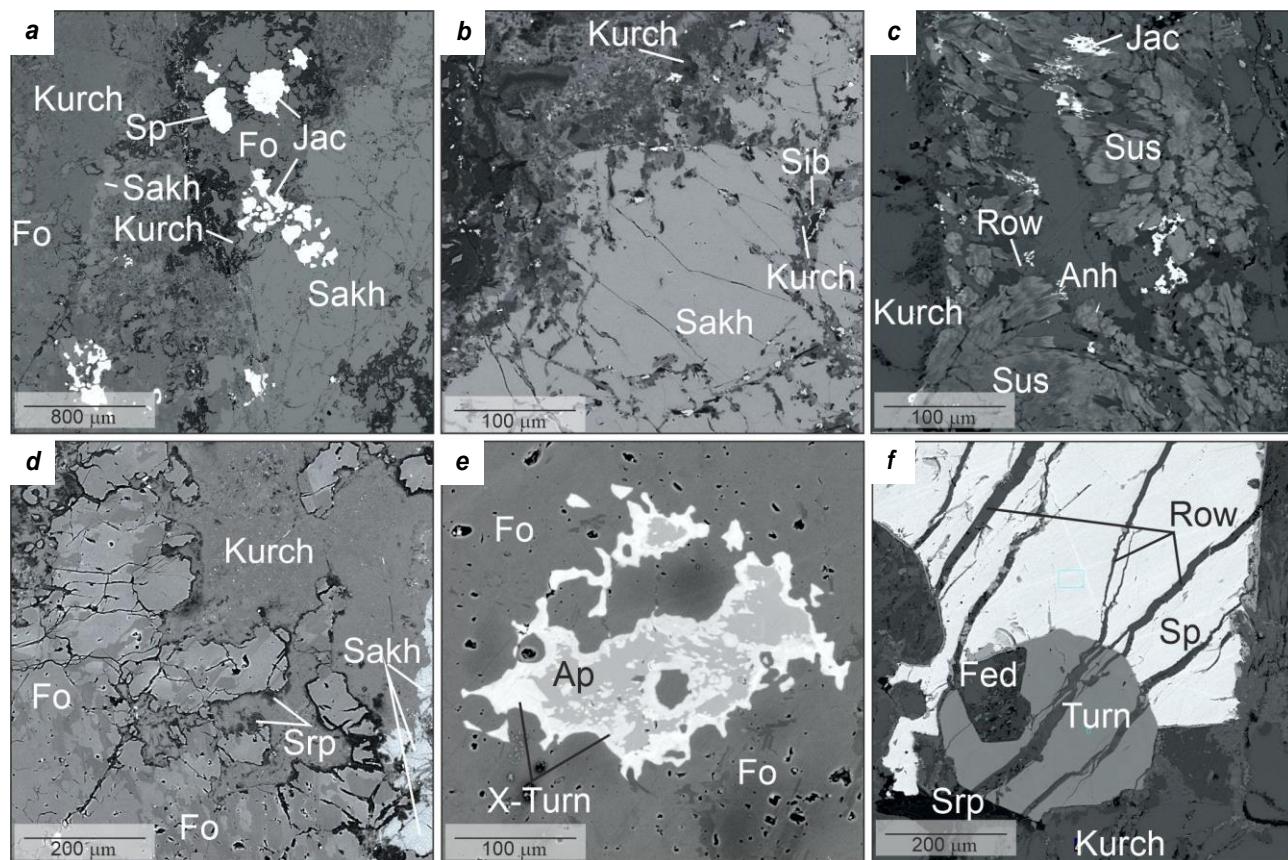


Рис. 3. Характер взаимоотношений минералов в курчатовит-сахаитовых рудах месторождения Солонго, образец Сол-844 (изображение в обратно отраженных электронах):
a – взаимоотношения сахаита, курчатовита и форстерита; b – курчатовит и сибирскит в обрамлении выделения сахаита; c – взаимоотношения суссексита, роутита и курчатовита; d – замещение форстерита серпентином; е – развитие минерала, близкого по составу к турнориту, по апатиту;
f – турнорит и сфалерит, секущиеся прожилками роутита
 Sakh – сахаит; Kurch – курчатовит; Sp – сфалерит; Fo – форстерит; Jac – якобсит;
 Sib – сибирскит; Sus – суссексит; Anh – ангидрит; Row – роутит; Srp – серпентин;
 Ap – апатит; Turn – турнорит; Fed – федоровскит

Fig. 3. Relationship nature of minerals in the kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo deposit, sample Sol-844 (backscattered electron image):

a – sakhaite, kurchatovite and forsterite relationships; b – kurchatovite and sibirskite framed by the sachaite excretion;
c – sussexeite, roweite, and kurchatovite relationships; d – forsterite substitution by serpentine; e – development of a mineral similar in composition to turneauite in terms of apatite; f – turneauite and sphalerite cut by roweite veinlets
 Sakh – sakhaite; Kurch – kurchatovite; Sp – sphalerite; Fo – forsterite; Jac – jacobsite; Sib – sibirskite; Sus – sussexeite;
 Anh – anhydrite; Row – roweite; Srp – serpentine; Ap – apatite; Turn – turneauite; Fed – fedorovskite

товита (см. рис. 2, а). Иногда реликты курчатовита наблюдаются в обрамлении выделений сахаита (см. рис. 3, б).

Сахаит и курчатовит подвергаются интенсивному преобразованию под воздействием гидротермальных процессов. Результатом этого является развитие прожилков полиминерального агрегата, состоящего из ссайбелиита $Mg_2[(OH)_2B_2O_4(OH)]$, сибирскита $CaHBO_3$ и кальцита (см. рис. 2, б; рис. 3, б). Иногда сахаит полностью замещается таким полиминеральным агрегатом (рис. 2, с). Ветвящиеся микропрожилки, гнезда и прожилки подобного

состава были обнаружены также по курчатовиту и недиагностированному борному минералу (см. рис. 2, д, е). В целом можно отметить, что курчатовит более устойчив к гидротермальным преобразованиям.

Кроме отмеченных ссайбелиита и сибирскита к более поздним боратам, образованным с замещением курчатовита и сахаита и содержащим воду в гидроксильной или молекулярной форме, относятся суссексит и пентагидроборит. Прожилки пентагидроборита $Ca[B_2O_5(OH)_6] \cdot 2H_2O$ приурочены к участкам замещения сахаита ссайбелиит-сибирскит-



кальцитовым агрегатом и рассекают сахаит, а также залечивают трещинки в титаните (рис. 2, b, f). Суссексит $Mn_2[(OH)B_2O_4(OH)]$ обнаружен в виде волокнистого агрегата в ассоциации с курчатовитом (3, c). Суссексит является марганцевым аналогом ссайбелиита и конечным членом изоморфного ряда ссайбелиит – суссексит, его образование связано с повышенным количеством марганца на месторождении.

Людвигит встречается в виде редких скоплений игольчатых кристаллов в курчатовите.

Титанит и форстерит являются реликтовыми минералами магнезиальных скарнов. В исследуемых образцах титанит имеется в большом количестве и наблюдается как в виде зерен деформированной, но приближенной к конвертообразной форме (см. рис. 2, b), так и в виде зерен неправильной формы различной величины. Оливин форстерит-тефритового ряда встречается в ассоциации с сахаитом, курчатовитом и интенсивно замещается серпентином (см. рис. 3, a, d). Для него свойственно повышенное содержание марганца (MnO – 13,54 масс. %).

В форстерите встречен апатит, по которому развивается минерал, близкий по составу к турнориту (рис. 3, e). По химическому составу в нем отмечается наличие Al_2O_3 (от 2,66 до 3,04 масс. %), SiO_2 (от 1,48 до 2,5 масс. %) и повышенное содержание P_2O_5 (от 15,15 до 16,5 масс. %). Зерно турнорита, обладающего максимально приближенным к теоретическому химическому составом, отмечено в ассоциации с курчатовитом и серпентином (рис. 3, f). Турнорит образует срастание со сфалеритом, федоровскитом $Ca_2(Mg,Mn^{2+})_2[B_4O_7](OH)_6$ и рассекается прожилками роуита $Ca_2Mn^{2+}2[B_4O_7](OH)_6$.

Из рудных минералов как в сахаите, так и в курчатовите и в ассоциирующих с ними минералах установлена вкрапленность сфалерита, магнетита и якосита ($MnFe_2O_4$) (см. рис. 3, a, f). Магнетит является наиболее распространенным акцессорным минералом всех пород и руд на Солонго, а примесь мар-

ганца в том или ином объеме характерна для магнетитовых руд месторождения [9]. По данным наших исследований, только в борных рудах содержания MnO в объеме более 17 масс. % позволяют определить акцессорный рудный минерал как якосит.

По мнению С. М. Александрова, образование боратов серии сахаита-харкерита генетически связано с гипабиссальными и приповерхностными месторождениями и происходит в условиях метасоматизма доломитов в контактах интрузий широкого петрохимического спектра составов, а также в зонах декомпрессии [13]. Курчатовит и сахаит развиваются на этапе ранней щелочной стадии постмагматического этапа эволюции магнезиально-скарнового месторождения, причем в отношении Солонго исследователь придерживается мнения об образовании сахаита путем замещения более ранних боратов, в том числе курчатовита [11]. По мнению зарубежных коллег [15, 16], образование скарнов с курчатовитом предполагает условия высокого давления, а скарны с сахаитом образуются при низком давлении и высоких температурах.

На основании петрологических наблюдений, а также данных, представленных в тематических отчетах^{6,7} и в работах С. М. Александрова [11, 17, 18], эволюцию минеральных форм нахождения бора в процессе формирования гипабиссального магнезиально-скарнового месторождения Солонго можно охарактеризовать последовательностью нескольких этапов.

1. На магматическом этапе бор находится в кристаллизующемся кислом расплаве. Вероятнее всего, повышенные содержания бора в гранитах Солонго определяются контаминацией расплава веществом осадочных пород, богатых бором.

2. На постмагматическом этапе на ранней щелочной стадии образуются бораты – суанит $Mg_2B_2O_5$ и котоит $Mg_3(BO_3)_2$. Их состав определяется составом замещаемых ими карбонатных пород и метасоматитов. Степень перегрева внедряющейся гранитной интрузии

⁶ Виноградов Б. К., Дорошевич Л. С., Ковалевская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

⁷ Малинко С. В. Вещественный состав и условия образования боратовой минерализации, генетически связанный с известковыми скарнами. М.: Изд-во ВИМС, 1970. 259 с.



определяет масштабы асимиляции при контактовых скарнов и минеральный состав зон, слагающих метасоматические ореолы по доломитам. С изменением доломитов образуются скарны, кальцифиры и котоитовые мраморы. Далее при поступлении в котоитовые мраморы постмагматических железосодержащих растворов вследствие неравновесности ассоциации котоит – магнетит в мраморах появляется людвигит.

3. На следующем этапе ранней щелочной стадии происходит снижение химической активности бора, показателя кислотности и температуры гидротермальных растворов. Магнезиальные скарны претерпевают известково-скарновое замещение. Курчатовит образуется позже котоита, суанита, людвигита и гумитов в форстеритовых кальцифирах по доломитам. Впоследствии сахайтовые породы могут замещать курчатовитовые руды, наследуя заключенный в них бор, а также якосит, марганецодержащий людвигит.

В то же время сахаит может развиваться самостоятельно по котоитовым мраморам с людвигитом с образованием избыточного магния и бора. Сахайтовые породы полностью наследуют бор котоита, сохраняя текстурные особенности исходных мраморов и вкрапленность магнезиальных минералов, включая магнезиолюдвигит.

Образование сахаита завершает ранний, высокотемпературный этап формирования боратного оруденения. Все последующие минералы бора имеют гистерогенный характер вследствие перераспределения бора при замещении его более ранних минералов. Здесь хотелось бы отметить, что экспериментальные данные И. Я. Некрасова и С. В. Малинко показали, что образование сахаита происходит при температуре более 300 °C [19]. По мнению С. М. Александрова, вариация температур от ранних эндогенных боратов до минералов бора, сингенетичных известково-скарновым и грейзеновым ассоциациям магнезиально-скарновых месторождений, варьирует от 600 до 300 °C [17]. При этом данный ученый отмечает возможность «пульсации теплового потока», что может проявляться в виде повто-

рения и соналожения минеральных ассоциаций. В целом ретроградное изменение температуры является одним из факторов эволюционной смены минеральных форм.

4. Следующим этапом эволюции является «среднетемпературный» этап, для которого характерны грейзенизация и формирование «наложенного» оруденения в виде отложения сульфидов. С переходом от ранней щелочной к кислотной стадии эндогенного процесса связано появление малых количеств фосфатов (апатита), арсенатов (свабита) и сульфатов (ангидрита).

5. Следующий этап – минералообразование поздней щелочной стадии. Этот этап завершает эндогенное формирование магнезиально-скарновых месторождений. Эндогенные изменения сахаита выражаются в появлении псевдоморфоз кальцит-сибирскит-ссайбеллит состава. Часть новообразуемых минералов отлагается по формирующимся трещинам. На заключительных фазах эндогенного процесса курчатовит, и сахаит замещаются ссайбеллитом, сибирскитом, кальцитом и другими вторичными боратами (фроловитом, пентагидроборитом и др.).

6. На заключительных фазах гидротермального процесса гистерогенные бораты (ссайбеллит, сибирскит и др.), в свою очередь, замещаются силикатами и карбонатами, частично или полностью утрачивая бор.

В целом предложенная последовательность этапов эволюции минералов бора на Солонго может быть подтверждена с применением как материалов данного исследования, так и некоторых данных предшественников. Исследователи Борной партии на основании расшифровки тектонического строения месторождения Солонго и движений отдельных его блоков оценили глубину формирования руд месторождения в 3–3,6 км⁸. Поскольку борная минерализация на месторождении развивается по участкам замещения магнезиальных скарнов и форстерит-диопсидовых кальцифирированных скарновыми скарнами, в борных рудах были обнаружены минералы, являющиеся реликтами магнезиальных скарнов, такие как форстерит и титанит. Парагенезис

⁸ Виноградов Б. К., Дорошевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.



сахаита с форстеритом проявлен также в рудах Чыбагалахского месторождения, в дополнение к ним обнаруживаются диопсид и людвигит [20]. С. В. Малинко в срастании с сахаитом отмечала гранаты, пироксены, магнетит, свабит, указывая на их более раннее выделение относительно сахаита. Первичные борные минералы – суанит и котоит – нами обнаружены не были. Тем не менее С. В. Малинко в своем исследовании по Солонго отмечает наличие суанита и котоита в образцах: суанит был отмечен ей в курчатовите в виде мелких идиоморфных кристаллов, отделенных реакционной каймой кальцита, а котоит спорадически присутствовал в сахаитовых рудах, обнаруживая признаки более раннего выделения [10], что соответствует представлениям о замещении сахаитом котоитовых мраморов. Сахаит и курчатовит, являющиеся непосредственными рудообразующими минералами исследуемых пород, формируются на этапе известково-скарнового замещения магнезиальных скарнов. Следующей стадией является переход от ранней щелочной стадии к кислотной, что, по мнению С. М. Александрова, фиксируется выделением арсенатов, апатита, ангидрита. Нами были обнаружены апатит, турнорит, ангидрит (см. рис. 3, е, ф). С. В. Малинко отмечала выделения свабита, турнорита и джонбаумита в борных рудах Солонго⁹ [10, 21]. Дальнейшее замещение сахаита и в меньшей степени курчатовита на гидротермальном этапе характеризуется развитием гистерогенных ссайбелиита и сусек-

сита, развитием ссайбелиит-сибирскит-кальцитового агрегата. Указанные минералы и полиминеральные агрегаты интенсивно развиты в изученных образцах. Фроловит, вимсит, уралборит, гексагидроборит, отмечаемые С. В. Малинко [10], как и пентагидроборит, который мы наблюдали в своих образцах, свидетельствуют о развитии гидротермального процесса на месторождении. Также тот факт, что рудные залежи на Солонго были подвержены гидротермальной переработке, отмечен Н. В. Чуконовым с соавторами [5]. Таким образом, борные руды на Солонго в определенной степени претерпели изменение и замещение вследствие гидротермальных процессов.

Изотопный состав кислорода $\delta^{18}\text{O}$ был исследован в минералах из образцов сахаит-курчатовитовых руд Солонго. Получены следующие результаты: в сахаите – +1 ‰, в роюте – +2,7 ‰, в курчатовите – +1,9 ‰, в магнетите (якобсите) – -0,3 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ v-SMOW.

Сравнение данных показало, что сахаит борных руд Солонго имеет более облегченный состав кислорода по сравнению с имеющимися в литературе показателями для сахаита из месторождений и рудопроявлений Якутии (рис. 4). Наиболее близкими показателями изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$, равными 3,4 ‰, обладают образцы сахаита из месторождений Чабыгалах и Докучан. Для остальных борных минералов литературных данных по изотопии кислорода обнаружено не было.

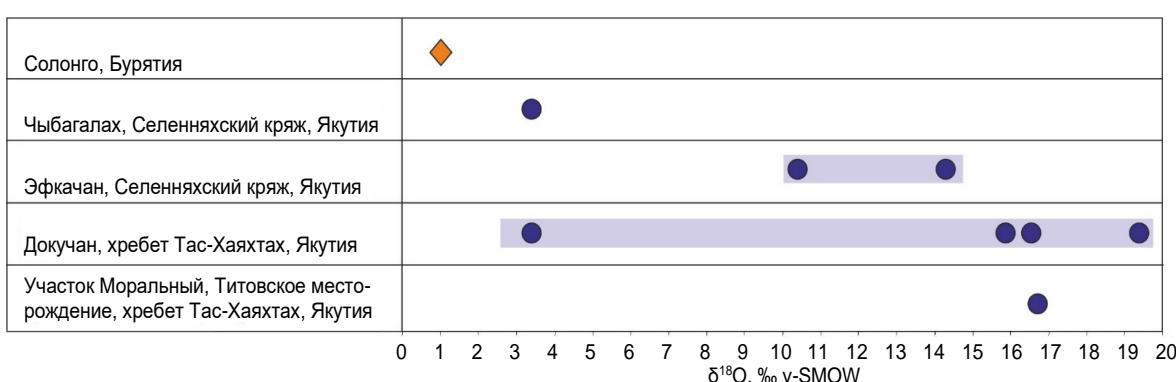


Рис. 4. Систематика изотопного состава кислорода в сахаите месторождения Солонго

Литературные данные по месторождениям Якутии приведены по источнику [17]

Fig. 4. Systematics of the oxygen isotopic composition in sphaelite from the Solongo deposit

Literature data on the Yakutian deposits are given according to the source [17]

⁹ Малинко С. В. Вещественный состав и условия образования боратовой минерализации, генетически связанной с известковыми скарнами. М.: Изд-во ВИМС, 1970. 259 с.



Согласно данным Борной партии¹⁰, формирование магнезиально-скарнового месторождения Солонго связывается с внедрением лейкократовой гранитной интрузии. Если принять это положение, то достаточно низкие значения изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в сахаите Солонго можно объяснить функционированием гидротермальной системы с участием метеорных вод в ореоле остывающей интрузии.

В соответствии с типологией, предложеной в работе [22], ореолы флюидов, взаимодействующих с интрузией, делят на «закрытые» ореолы, флюиды в которых происходят из интрузий, и «открытые» ореолы, которые на протяжении какой-либо части своего функционирования взаимодействовали с флюидами внешнего происхождения. Глубина, до которой могут проникать метеорные воды, оценивается в 6 км, а по некоторым данным даже до 12 км [23]. Учитывая тот факт, что месторождение Солонго образовалось в гипабиссальных условиях, вероятность существования открытой гидротермальной системы очень высока.

По мнению С. М. Александрова [17], изотопный состав кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в карбонатоборатах серии сахаита – харкерита формируется последовательно в процессе образования минералов начиная с замещения доломитов и может быть охарактеризован следующим образом. Первоначальный изотопный состав кислорода осадочных карбонатных пород соответствует величинам $\delta^{18}\text{O}$ от 30 до 20–22 ‰. На магматической стадии и ранних стадиях постмагматического процесса изотопный состав карбонат-иона под влиянием флюидов глубинного происхождения последовательно изменяется к мраморизованным карбонатам, метаморфогенным карбонатам мраморов и далее в карбонатах кальцифиров и в карбонатах пироксеновых скарнов, достигая по величинам $\delta^{18}\text{O}$ до 16 ‰. В момент образования сахаита на раннем постмагматическом этапе изотопный состав кислорода в нем также варьирует в пределах 15–17 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ v-SMOW. В дальнейшем при вовлечении в процесс минералообразования метеорных вод и

кислорода атмосферы величина изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ карбонатоборатов серии сахаита – харкерита и всех видов выделенных по ним псевдоморфоз (агрегатов сибирскита, ссайбелиита, кальцита, ольшанскита и др.) уменьшается до 7,5 ‰, а в условиях воздействия талых вод многолетней мерзлоты и снежников, наиболее обогащенных легкими изотопами кислорода, – до 3,5 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ v-SMOW [17].

Не исключено, что под влиянием гидротермальной переработки борных руд показатели изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в борных минералах могут опускаться и до более низких значений. При рассмотрении сахаитсодержащих борных руд месторождения Солонго мы не фиксируем значений изотопного состава кислорода по минералам выше значений +2,7 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ v-SMOW, что также может указывать на существенную роль в их формировании флюидов метеорного происхождения. При этом гидротермальная система могла действовать не только на поздних постмагматических этапах формирования месторождения, что может быть обусловлено изменением теплового потока в зоне рудообразования, например в связи с внедрением мезозойских граносиенитовых и долеритовых даек, но и непосредственно на магматическом и раннем постмагматическом этапе. Это могло вызвать снижение показателей изотопного состава кислорода уже в неизмененном сахаите.

Кроме того, еще одним фактором, который мог повлиять на существенное снижение показателей изотопного состава кислорода в сахаите уже на стадии его образования, является тенденция обогащения доломитов Озернинского рудного узла легким изотопом кислорода, отмеченная в работе [24]. Данное обстоятельство объясняется авторами названной работы колебаниями физико-химических условий бассейна седиментации и вариацией окислительно-восстановительного потенциала.

Полученные данные свидетельствуют об участии метеорных вод в формировании месторождения Солонго, а также подтверждают сложность и многоэтапность развития магне-

¹⁰ Виноградов Б. К., Дорошевич Л. С., Ковалевская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.



зиально-скарновых месторождений эндогенных боратов.

Заключение

Комплексное железо-борное магнезиально-скарновое месторождение Солонго, расположенное в Озернинском рудном узле (Республика Бурятия), заключает в себе залики редких борных сахаит-курчатовитовых руд, которые в перспективе могут рассматриваться в качестве источника сырья для минеральных удобрений. Борные рудные тела, включающие данные минералы, расположены по внешним частям магнезиальных скарнов и в зоне кальцифиров. Образование сахаита на Солонго связывается с замещением более ранних котоитовых мраморов и курчатовита на раннем постмагматическом этапе формирования скарнового месторождения сингенетично с процессом известково-скарнового замещения магнезиальных скарнов.

Сахаит и курчатовит в рудах замещаются полиминеральным скайбелиит-сибирскит-кальцитовым агрегатом и отмечены в ассоциации с федоровским, роуитом, суссекситом, пентагидроборитом. Также борные минералы в сахаит-курчатовитовых рудах ассоциируют с форстеритом, серпентином, титанитом, сфalerитом, якоситом. Про этом образование

якосита, суссексита, роуита определяется повышенным содержанием марганца на месторождении. Также в рудах в небольших объемах найден редкий арсенат кальция турнорит.

При сравнении изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в сахаите из месторождения Солонго была выявлена его обогащенность легким изотопом кислорода по сравнению с сахаитом из месторождений и рудопроявлений Якутии. На формирование пониженных показателей изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ сахаита на Солонго могло повлиять несколько факторов. Возможно изначальное образование сахаита с пониженными показателями изотопного состава кислорода в связи с общей обогащенностью легким изотопом кислорода доломитов Озернинского рудного узла и деятельностью гидротермальной системы с участием метеорных вод в окружении оставшейся лейкоократовой гранитной интрузии, с которой связывается формирование месторождения на этапе. Также понижение показателей изотопного состава кислорода в сахаите Солонго возможно благодаря гидротермальной переработке борных руд с участием метеорных вод, в том числе талых вод многолетней мерзлоты и снежников, на позднем постмагматическом этапе развития месторождения.

Список источников

1. Малинко С. В., Лисицын А. Е., Дорофеева К. А., Островская И. В., Шашкин Д. П. Курчатовит – новый минерал // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1966. Ч. 95. Вып. 2. С. 203–209.
2. Малинко С. В. Новый минерал бора – солонгоит // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1974. Ч. 103. Вып. 1. С. 117–121.
3. Малинко С. В., Шашкин Д. П., Юркина К. В. Федоровскит – новый минерал бора и изоморфный ряд роуит – федоровскит // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1976. Ч. 105. Вып. 1. С. 71–85.
4. Симонов М. А., Малинко С. В., Белов Н. В., Казанская Е. В., Егоров-Тисменко Ю. К., Федоренко М. Б. [и др.]. Новый минерал гексагидроборит $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1977. Ч. 106. Вып. 6. С. 688–691.
5. Чуканов Н. В., Пеков И. В., Малинко С. В., Задов А. Е., Дубинчук В. Т. Витимит $\text{Ca}_6\text{B}_{14}\text{O}_{19}[\text{SO}_4](\text{OH})_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – новый минерал и условия его образования на месторождении Солонго (Бурятия) // Записки Всероссийского минералогического общества. 2002. Ч. 131. Вып. 4. С. 41–47.
6. Малинко С. В., Чуканов Н. В., Дубинчук В. Т., Задов А. Е. Бурятит $\text{Ca}_3(\text{Si}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})[\text{SO}_4][\text{B}(\text{OH})_4](\text{OH}) \cdot 5\text{O} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – новый минерал // Записки Всероссийского минералогического общества. 2001. Ч. 130. Вып. 2. С. 72–78.
7. Гордиенко И. В., Булгатов А. Н., Руженцев С. В., Минина О. Р., Климук В. С., Ветлужских Л. И. [и др.]. История развития Удино-Витимской островодужной системы Забайкальского сектора Палеоазиатского океана в позднем рифее-палеозое // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 589–614.
8. Избродина С. Ю., Хубанов В. Б. Роль гранитизации в формировании магнезиально-скарнового железо-борного месторождения Солонго (Озернинский рудный узел, Республика Бурятия) // Новое в познании процессов рудообразования: сб. тр. Х Рос. молодежн. науч.-практ. школы с междунар. уч. (г. Москва, 29 ноября – 3 декабря 2021 г.). М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2021. С. 116–119.
9. Лисицын А. Е., Виноградов Б. К., Малинко С. В. Скарны месторождения Солонго в Бурятии и ихрудносность // Советская геология. 1974. № 3. С. 116–123.



10. Малинко С. В., Лисицын А. Е. Экзотические борные руды месторождения Солонго в Бурятии // Руды и металлы. 1997. № 5. С. 63–71.
11. Александров С. М. Генезис и состав рудообразующих магнезиальных боратов, их аналогов и модификаций // Геохимия. 2003. № 5. С. 492–512.
12. Pankova Yu. A., Krivovichev S. V., Pekov I. V., Grew E. S., Yapaskurt V. O. Kurchatovite and clinokurchatovite, ideally CaMgB_2O_5 : an example of modular polymorphism // Minerals. 2018. Vol. 8. Iss. 8. P. 332. <https://doi.org/10.3390/min8080332>.
13. Александров С. М. Генезис и изоморфизм в боратах серии сахаита-харкерита на магнезиально-скарновых месторождениях северо-востока России // Геохимия. 2005. № 9. С. 966–989.
14. Sharp Z. D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1990. Vol. 54. Iss. 5. P. 1353–1357. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90160-M](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90160-M).
15. Marincea Ş., Dumitras D.-G. Contrasting types of boron-bearing deposits in magnesian skarns from Romania // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 112. P. 102952. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102952>.
16. Evans R. J., Groat L. A., Cempirek J., Škoda R., Grew E. S., Bernard C. The crystal chemistry of the sakhite-harkerite solid solution // American Mineralogist. 2018. Vol. 103. Iss. 11.
17. Александров С. М. Геохимия скарно- и рудообразования в доломитах. М.: Наука, 1990. 343 с.
18. Александров С. М. Эндогенные изменения коитита в кальцифириях магнезиально-скарновых месторождений бора // Геохимия. 2007. № 7. С. 733–752.
19. Некрасов И. Я., Малинко С. В. Экспериментальное изучение условий образования сахаита // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 210. № 6. С. 1427–1430.
20. Александров С. М., Малинко С. В. Геохимические особенности эндогенных и экзогенных изменений карбонатоборатов // Геохимия. 1975. № 1. С. 3–16.
21. Малинко С. В., Чуканов Н. В. Арсенатные аналоги апатита – турнорит и джонбаумит из месторождения Солонго, Бурятия // Записки Всероссийского минералогического общества. 1998. № 3. С. 92–95.
22. Nabelek P. I. Stable isotope monitors // Contact metamorphism / ed. D. M. Kerrick. Berlin – Boston: De Gruyter, 1991. P. 395–435.
23. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Berlin: Springer, 2009. 285 p.
24. Ковалев К. Р., Рипп Г. С., Дистанов Э. Г., Баулина М. В. Железисто-магнезиальные карбонаты и вариации изотопов углерода и кислорода на гидротермально-осадочном колчеданно-полиметаллическом месторождении Озерное (Забайкалье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 4. С. 383–397.

References

1. Malinko S. V., Lisitsyn A. E., Dorofeeva K. A., Os-trovskaya I. V., Shashkin D. P. A new mineral kurchatovite. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva. 1966;95(2):203-209. (In Russ.).
2. Malinko S. V. A new boron mineral – solongoite. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva. 1974;103(1):117-121. (In Russ.).
3. Malinko S. V., Shashkin D. P., Yurkina K. V. Fedorovskite as a new mineral of boron and as an isomorphic series of roweite. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva. 1976;105(1):71-85. (In Russ.).
4. Simonov M. A., Malinko S. V., Belov N. V., Kazanskaya E. V., Egorov-Tismenko Yu. K., Fe-dorenko M. B., et al. New mineral hexahydroborite $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva. 1977;106(6):688-691. (In Russ.).
5. Chukanov N. V., Pekov I. V., Malinko S. V., Zadov A. E., Dubinchuk V. T. A new mineral vitimite $\text{Ca}_6\text{B}_{14}\text{O}_{19}[\text{SO}_4](\text{OH})_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ and its formation conditions at the Solongo deposit (Buryatia). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2002;131(4):41-47. (In Russ.).
6. Malinko S. V., Chukanov N. V., Dubinchuk V. T., Zadov A. E. A new mineral buryatite $\text{Ca}_3(\text{Si},\text{Fe}^{3+},\text{Al})[\text{SO}_4][\text{B}(\text{OH})_4](\text{OH}) \cdot 5\text{O} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2001;130(2):72-78. (In Russ.).
7. Gordienko I. V., Bulgatov A. N., Ruzhentsev S. V., Minina O. R., Klimuk V. S., Vetluzhskikh L. I., et al. The late riphean-paleozoic history of the Uda-Vitim Island Arc System in the Transbaikalian sector of the Paleoasian Ocean.
8. Izbrodina S. Yu., Khubanov V. B. The role of granitization in the formation of the Solongo magnesian-skarn iron-boron deposit (Ozerninsky ore cluster, Republic of Buryatia). In: Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: sb. tr. X Ros. molodezhn. nauch.-prakt. shkoly s mezhdunar. uch. = New in ore formation processes perception: Collected works of the 10th Russian youth scientific and practical school with international participation. 29 November – 3 December 2021, Moscow. Moscow: Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences; 2021, p. 116–119. (In Russ.).
9. Lisitsyn A. E., Vinogradov B. K., Malinko S. V. Skarns of the Solongo deposit in Buryatia and their ore content. Sovetskaya geologiya. 1974;3:116-123. (In Russ.).
10. Malinko S. V., Lisitsyn A. E. Exotic boron ores from the Solongo deposit in Buryatia. Rudy i metally = Ores and Metals. 1997;5:63-71. (In Russ.).
11. Aleksandrov S. M. Genesis and composition of ore-forming magnesian borates, their analogues, and modifications. Geokhimiya. 2003;5:492-512. (In Russ.).
12. Pankova Yu. A., Krivovichev S. V., Pekov I. V., Grew E. S., Yapaskurt V. O. Kurchatovite and clinokurchatovite, ideally CaMgB_2O_5 : an example of modular polymorphism. Minerals. 2018;8(8):332. <https://doi.org/10.3390/min8080332>.
13. Aleksandrov S. M. Borates of the sakhite-harkerite series at magnesian skarn deposits in the north-east of Russia: genesis and isomorphism. Geokhimiya.



2005;9:966-989. (In Russ.).

14. Sharp Z. D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990;54(5):1353-1357. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90160-M](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90160-M).

15. Marincea S., Dumitras D.-G. Contrasting types of boron-bearing deposits in magnesian skarns from Romania. *Ore Geology Reviews*. 2019;112:102952. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102952>.

16. Evans R. J., Groat L. A., Cempirek J., Škoda R., Grew E. S., Bernard C. The crystal chemistry of the sakhite-harkerite solid solution. *American Mineralogist*. 2018;103(11):1749-1760. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6563>.

17. Aleksandrov S. M. *Geochemistry of skarn and ore formation in dolomites*. Moscow: Nauka; 1990. 343 p. (In Russ.).

18. Aleksandrov S. M. Endogenous transformations of kotoite in calciphyres at magnesian-skarn deposits of boron. *Geokhimiya*. 2007;7:733-752. (In Russ.).

19. Nekrasov I. Ya., Malinko S. V. Experimental study of sakhite formation conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1973;210(6):1427-1430. (In Russ.).

20. Aleksandrov S. M., Malinko S. V. Geochemical features of endogenous and exogenous changes in borate carbonates. *Geokhimiya*. 1975;1:3-16. (In Russ.).

21. Malinko S. V., Chukanov N. V. Arsenate analogs of apatite –turneaureite and johnbaumite from the Solongo deposit, Buryatia. *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva = Proceedings of the All-Russian Mineralogical Society*. 1998;3:92-95. (In Russ.).

22. Nabelek P. I. Stable isotope monitors. In: Kerrick D. M. (ed.). *Contact metamorphism*. Berlin – Boston: De Gruyter; 1991, p. 395–435.

23 Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin: Springer; 2009. 285 p.

24. Kovalev K. R., Ripp G. S., Distanov E. G., Baulina M. V. FE-Mg carbonates and variations in isotopic compositions of carbon and oxygen at the Ozernoe hydrothermal-sedimentary pyrite-polymetallic deposit (Transbaikalia). *Geologiya i geofizika*. 2005;46(4):383-397. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Избродина Светлана Юрьевна,
инженер Лаборатории металлогенеза и рудообразования,
Геологический институт им. Н. Л. Добретцова СО РАН,
г. Улан-Удэ, Россия,
izbrodina@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3797-4939>.

Svetlana Yu. Izbrodina,
Engineer of the Laboratory of Metallogeny and Ore Formation,
Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia,
izbrodina@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3797-4939>.



Посохов Виктор Федорович,
старший научный сотрудник Лаборатории инструментальных методов анализа,
Геологический институт им. Н. Л. Добретцова СО РАН,
г. Улан-Удэ, Россия,
vitaf1@yandex.ru.

Viktor F. Posokhov,
Senior Researcher of the Laboratory of Instrumental Methods of Analysis,
Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia,
vitaf1@yandex.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Избродина С. Ю. выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати; Посохов В. Ф. выполнил исследование изотопного состава кислорода в минералах и интерпретацию полученных данных.

Izbrodina S. Yu. carried out the research, summarized the results obtained, prepared the manuscript for publication. Posokhov V. F. conducted the study of the isotopic composition of oxygen in minerals and interpreted the data obtained.

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 25.02.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принятa к публикации 11.05.2022.

The article was submitted 25.02.2022; approved after reviewing 07.04.2022; accepted for publication 11.05.2022.



Научная статья

УДК 550.3+550.8

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-119-136>



Результаты геолого-геофизического исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, их связь с месторождениями полезных ископаемых

Андрей Леонидович Харитонов^a

^aИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, г. Москва, Россия

Резюме. Целью исследования являлось рассмотрение вопросов геолого-геофизической интерпретации данных аэростатных и спутниковых магнитных измерений вдоль регионального профиля, пересекающего территорию Ангаро-Байкальского региона. Для проведения научных исследований вдоль регионального транссибирского геолого-геофизического профиля А-В автором были использованы различные геолого-геофизические материалы (цифровые данные магнитного поля, измеренные на искусственном спутнике Земли MAGSAT и аэростате; данные значений удельного электрического сопротивления в мантии этого региона; геотермические данные; сейсмические данные о расположении гипоцентров землетрясений в районе прохождения профиля исследований). Методами исследования послужили многоуровневые измерения спутникового и аэростатного магнитных полей, что позволило значительно расширить возможности для геолого-геофизической интерпретации полученных данных. В результате проведенного исследования выявлено, что геолого-геофизическая интерпретация многоуровневых аэромагнитных данных позволяет достаточно точно определять координаты месторасположения и глубину проникновения в литосферу тектонических разломов, связанных с Ангарским и Забайкальским мантийными плюмами, которые представляют значительный интерес для поисков месторождений угля и урана. Полученные по аэростатным и спутниковым данным пространственные и глубинные характеристики тектонических разломов подтверждаются комплексом анализируемых независимых геофизических данных (магнитотеллурического зондирования, геотермии, сейсмологии и других геофизических методов). В качестве выводов можно заключить, что автором продемонстрирована возможность применения спутниковых и аэростатных магнитных съемок для исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Необходимо также отметить, что по аэростатным и спутниковым магнитным данным могут быть выявлены крупные глубинные тектонические разломы литосферы (Баргузинский, Икатский, Туколамский, Тунгирский), которые по особым точкам магнитоактивных зон этих разломов также позволяют маркировать различные субгоризонтальные границы литосферных слоев в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Практическая значимость проведенной работы заключается в том, что была выявлена пространственная взаимосвязь расположения Ангарского мантийного плюма и месторождений угля Иркутского бассейна, а также месторождений урана в зоне расположения Забайкальского мантийного плюма.

Ключевые слова: Ангарский и Забайкальский мантийные плюмы, аэростатные и спутниковые магнитные исследования, разрез земной коры, комплекс геофизических методов, месторождения угля и урана

Для цитирования: Харитонов А. Л. Результаты геолого-геофизического исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, их связь с месторождениями полезных ископаемых // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 119–136. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-119-136>.

Original article

Results of geological and geophysical study of the deep structure of Angara and Trans-Baikal mantle plumes and their connection with mineral deposits

Andrey L. Kharitonova^a

^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the article is to consider the issues of geological and geophysical interpretation of the data of balloon and satellite magnetic measurements along the regional profile crossing the territory of the Angara-Baikal region.



In order to conduct scientific research along the regional Trans-Siberian geological and geophysical profile A-B the author used various geological and geophysical materials including the magnetic field digital data measured by the MAGSAT artificial Earth satellite and a balloon; data on the values of the electrical resistivity in the mantle of this region; geothermal data; seismic data on the location of earthquake hypocenters in the area of the profile under investigation. The research methods involved multilevel measurements of satellite and balloon magnetic fields, which significantly expanded the possibilities of geological and geophysical interpretation of the data obtained. The conducted study revealed that the geological and geophysical interpretation of multilevel aeromagnetic data allows for a reasonably accurate determination of the location coordinates and lithospheric penetration depth of tectonic faults associated with the Angara and Trans-Baikal mantle plumes, which are of significant interest in terms of exploration of coal and uranium deposits. The spatial and depth characteristics of tectonic faults obtained from balloon and satellite data are confirmed by a set of analyzed independent geophysical data: magnetotelluric sounding, geothermy, seismology and other geophysical methods. In conclusion it should be noted that the author has demonstrated the application possibility of satellite and balloon magnetic surveys for the study of the deep structure of the Angara and Trans-Baikal mantle plumes. In addition, it was found out that according to balloon and satellite magnetic data, large deep tectonic faults in the lithosphere (Barguzinsky, Ikatsky, Tukolamsky, Tungirsky) can be identified, which also allow marking various subhorizontal boundaries of lithospheric layers in the location area of the Angara and Trans-Baikal mantle plumes using special points of the magnetically active zones of these faults. The practical significance of the conducted research is in the identification of the spatial relationship between the location of the Angara mantle plume and coal deposits of the Irkutsk basin, as well as uranium deposits in the zone of the Trans-Baikal mantle plume.

Keywords: Angara and Trans-Baikal mantle plumes, balloon and satellite magnetic studies, section of the Earth's crust, combination of geophysical methods, coal and uranium deposits

For citation: Kharitonov A. L. Results of geological and geophysical study of the deep structure of Angara and Trans-Baikal mantle plumes and their connection with mineral deposits. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):119-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-119-136>.

Введение

Ангаро-Байкальский регион расположен в южной части территории Сибирского кратона (рис. 1). Сибирский кратон, расположенный между 84-м и 120-м градусами восточной долготы и севернее 50-го градуса северной широты, в свою очередь, является гигантской почти кольцевой чашеобразной тектонической структурой второго порядка (1500–2000 км) [1] с размерами 2230×2000 км, состоящей из множества «дочерних» кольцевых структур меньшего диаметра третьего порядка (1000–1500 км): Ангарской, Тунгусской, Анабарской, Алдано-Становой, Забайкальской, а также из структур меньших размеров, сформированных одноименными мантийными плюмами. Основная кольцевая чашеобразная структура Сибирского кратона имеет литосферные «корни», глубоко проникающие в нижележащую мантию Земли до 225 км в его центральной части [2] (рис. 2).

Почти кольцевая структура Сибирского кратона достаточно хорошо картируется по данным значений интенсивных аномалий магнитного поля (рис. 3).

Глубинная тектоническая структура Сибирского кратона, формирующего «дочерние» кольцевые структуры меньшего диаметра Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов

(см. рис. 3), непосредственно примыкающих с юга к территории основной почти кольцевой структуры Сибирского кратона, недостаточно охвачена региональными съемками глубинного сейсмического зондирования (с глубиной зондирования более 50–225 км) [3], что не позволяет надежно прогнозировать глубинное тектоническое строение данного района, изучать его современную геодинамику, а также надежно проводить поиски новых месторождений полезных ископаемых. В связи с этим мы считаем, что, учитывая очень сложный рельеф земной поверхности в пределах Ангаро-Байкальского региона, в условиях которого трудно проводить наземные сейморазведочные работы, сложно изучать глубинное тектоническое строение Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов без использования аэростатных [4] и спутниковых [5, 6] магнитных методов, не зависящих от пересеченного рельефа местности этого региона. При этом спутниковые магнитные [5, 6] и аэростатные магнитные методы [4, 7] исследования регионального глубинного строения сложно-построенных регионов являются одними из наиболее экологически чистых и относительно недорогих геофизических методов исследования глубинного строения литосферы.

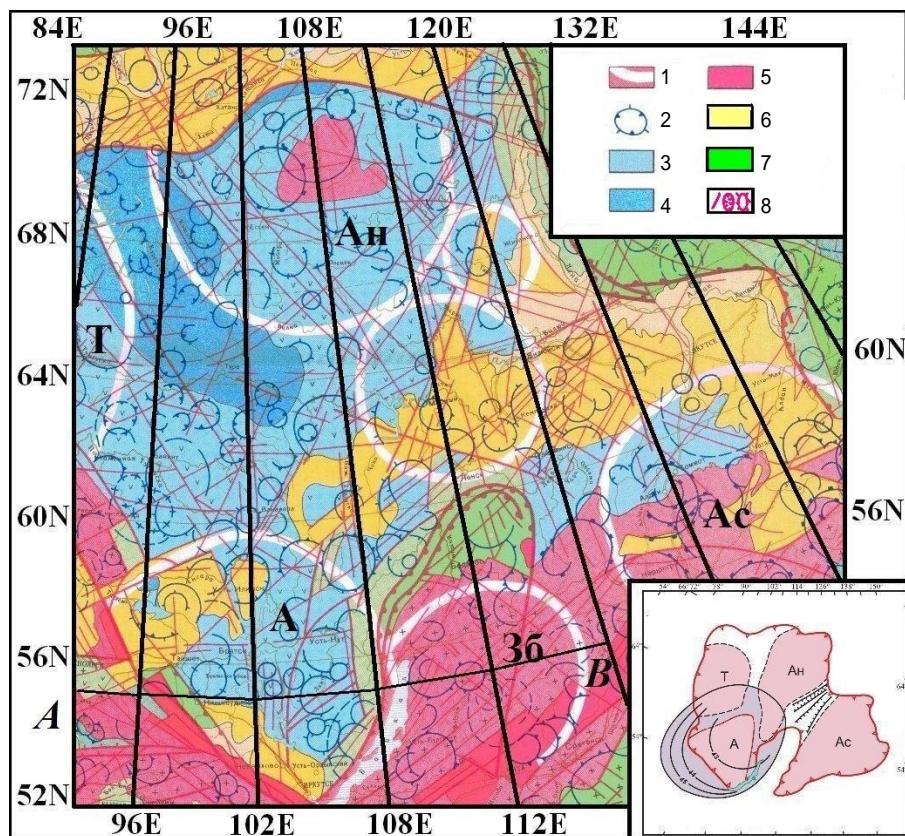


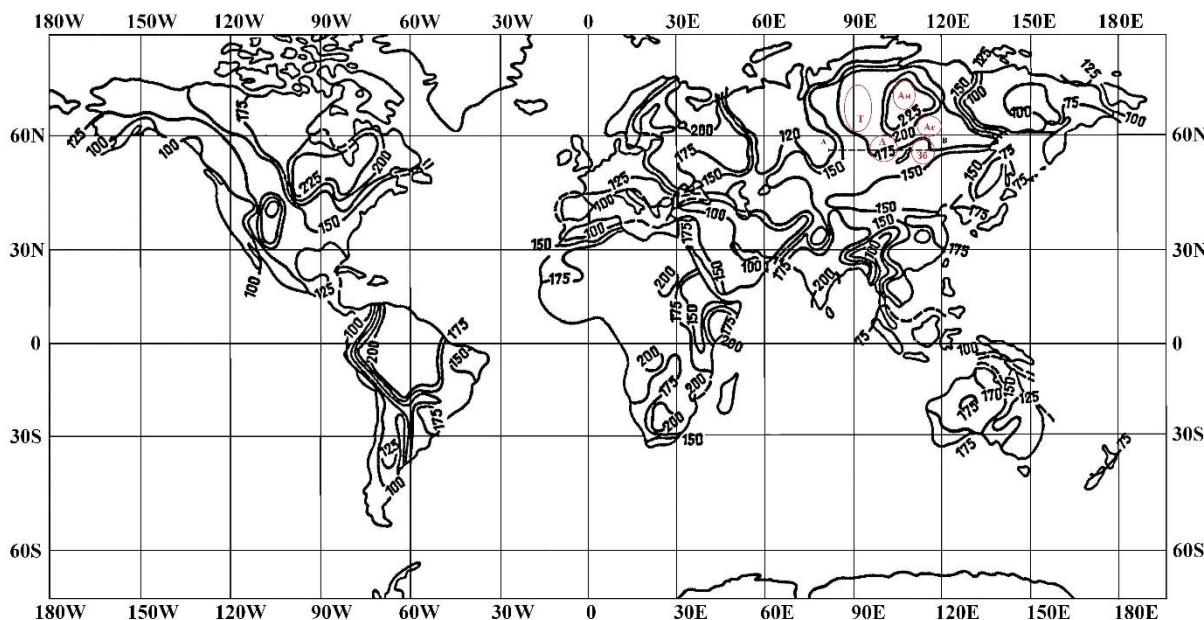
Рис. 1. Фрагмент карты космо-геологических объектов России на территорию Сибирского кратона¹:

1 – кольцевые объекты (нуклеары) – дешифрируемые геологические (морфологические) структуры центрального типа и их фрагменты: А – Ангарский, 36 – Забайкальский, Т – Тунгусский, Ан – Анабарский, Ас – Алдано-Становой; 2 – мелкие («дочерние») кольцевые морфологические структуры центрального типа (окружности синего цвета), сформированные вулкано-тектоническими объектами; 3–7 – преимущественный геохимический состав горных пород верхних слоев Сибирского кратона: 3 – преимущественно осадочные и туфогенные образования, слабо дислоцированные прерывистой складчатостью силурийского и ордовикского возраста, 4 – вулканогенные образования зон повышенной магматической проницаемости, переработанные тектоническими и денудационными процессами, 5 – отдельные крупные массивы интрузивных пород различного состава докембрийского возраста, 6 – области преимущественного расположения осадочных пород юрского возраста, 7 – области преимущественного расположения слабо метаморфизованных комплексов осадочных пород карбонового возраста, 8 – тектонические нарушения (тектонические разломы, сбросы, взбросы)
Врезка в нижней части карты – мегаблоки литосферы Сибирского кратона:
А – Ангарский, Т – Тунгусский, Ан – Анабарский, Ас – Алдано-Становой
А-В – линия, обозначающая месторасположение регионального профиля геолого-геофизических исследований

Fig. 1. Fragment of the map of cosmogeological objects of Russia on the territory of the Siberian craton¹:

1 – ring objects (nuclears) – deciphered geological (morphological) structures of the central type and their fragments: A – Angara, 36 – Trans-Baikal, T – Tunguska, An – Anabar, Ac – Aldano-Stanovoy; 2 – small ("daughter") ring morphological structures of the central type (blue circles) formed by volcanic-tectonic objects; 3–7 – predominant geochemical composition of rocks of the upper layers of the Siberian craton: 3 – mainly sedimentary and tuff formations weakly dislocated by the intermittent folding of the Silurian and Ordovician age; 4 – volcanogenic formations of zones of increased magmatic permeability processed by tectonic and denudation processes; 5 – separate large massifs of intrusive rocks of various compositions of the Precambrian age; 6 – areas of predominant location of Jurassic sedimentary rocks; 7 – areas of predominant location of weakly metamorphosed complexes of carboniferous sedimentary rocks; 8 – tectonic disturbances (tectonic faults, normal faults, thrust fault)
Inset at the bottom of the map – mega-blocks of the Siberian craton lithosphere:
A – Angara; T – Tunguska; An – Anabar; Ac – Aldano-Stanovoy;
A-B – a location line of the regional profile of the geological and geophysical research

¹ Карта космогеологических объектов России. М-б 1:10000000 / ред. А. И. Бурдэ, Н. В. Межеловский. М.: Изд-во КРФ ГИН «Геокарт», 1995.



**Рис. 2. Схема толщины литосферы, км, по данным поверхностных волн
(по источнику [2] с дополнениями автора):**

*A-B – линия, обозначающая прохождение регионального геолого-геофизического профиля
вдоль 55-го градуса северной широты*

Зоны расположения мантийных плюмов (на территории Сибирского кратона):

A – Ангарского; 36 – Забайкальского; Т – Тунгусского; Ан – Анабарского; Ас – Алдано-Станового

**Fig. 2. Diagram of the lithosphere thickness (km) based on the surface wave data
(according to the source [2] with author's additions):**

*A-B – a line of the passage of the regional geological and geophysical profile along the latitude of 55°N
Location zones of mantle plumes (on the territory of the Siberian craton):*

A – Angara; 36 – Trans-Baikal; T – Tunguska; An – Anabar; Ac – Aldano-Stanovoy

Материалы и методы исследования

В ряде опубликованных статей [4, 7] показано, что для выделения тектонических разломов, обычно ограничивающих в бортовых зонах корневую структуру мантийных плюмов, могут быть использованы многоуровневые измерения потенциальных полей (магнитного, гравитационного), что значительно расширяет возможности для геолого-геофизической интерпретации полученных данных. Исследование глубинного тектонического строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов трудно проводить без использования региональных геофизических методов, поскольку изучение региональных неоднородностей глубинного строения земной коры и мантии может определять глубинные особенности Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов [4, 7]. В связи с этим в данной статье рассматриваются результаты решения обратной задачи по данным аэростатных и спутниковых измерений магнитных полей [5, 8–11].

В частности, нами было выполнено решение обратной задачи магнитного потенциала по данным аномального магнитного поля, измеренного на искусственном спутнике Земли MAGSAT, которое проводилось на основании методики, разработанной и описанной коллегами в источниках [5, 10, 11], для аппроксимации глубины залегания особых точек магнитоактивных тел $d(\phi, \lambda, h)$, связанных с тектоническими структурами литосферы. Основную формулу, используемую для оценки глубины $d(\phi, \lambda, h)$, в этой методике можно представить как

$$[InS(w)](\phi, \lambda, h) = [InC](\phi, \lambda, h) - [w \cdot d(\phi, \lambda, h)], \quad (1)$$

где $[InS(w)](\phi, \lambda, h)$ – логарифм амплитудного спектра магнитного поля для каждой точки профиля (ϕ, λ, h) ; $[InC](\phi, \lambda, h)$ – ордината линии регрессии, аппроксимирующей линейную часть логарифма спектра магнитного поля; w – круговая частота спектра; $d(\phi, \lambda, h)$ – глубина расположения особых точек магнитоактивных тел для каждой точки пункта (ϕ, λ, h) .

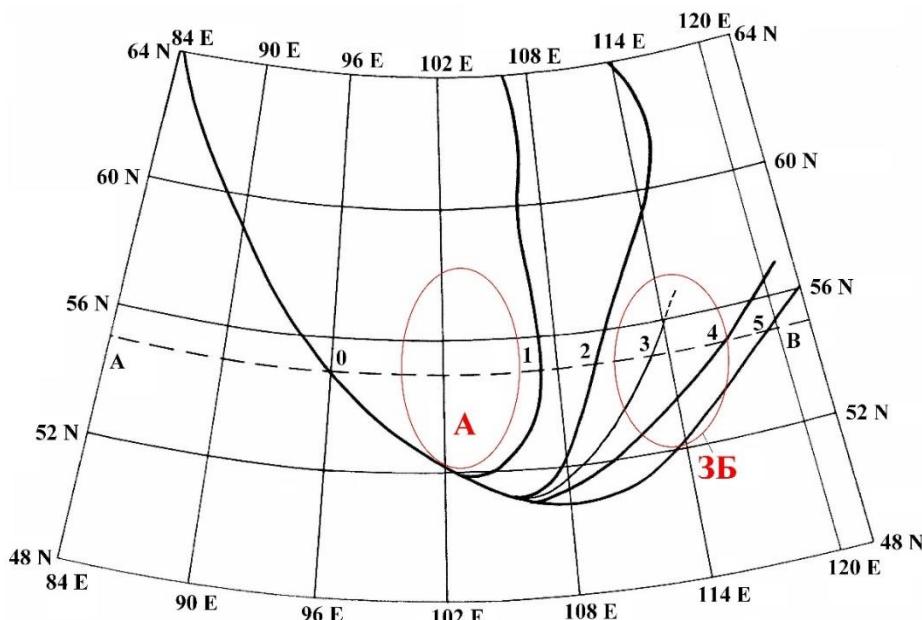


Рис. 3. Схема расположения осевых линий цепочек высокомагнитных аномалий магнитного поля (0–5), связанных с кольцевыми структурами намагниченных магматических пород на территории Сибирского кратона (составлена на основе карты аномального магнитного поля территории Союза Советских Социалистических Республик²):

A-B – линия, обозначающая прохождение аэростатного магнитного профиля через территорию, занимаемую Ангарским (0, 1) и Забайкальским (3–5) мантийными плюмами по 55-му градусу северной широты; 2 – линия, обозначающая положение центральной части приповерхностной грабен-образной зоны Байкальской рифтовой системы

Fig. 3. Location diagram of the axial lines of high-amplitude magnetic field anomaly chains (0–5) associated with the ring structures of the magnetized igneous rocks on the territory of the Siberian craton (the diagram is compiled on the basis of the map of the anomalous magnetic field of the territory of the USSR²):
A-B – a line of the passage of the balloon magnetic profile via the territory of the Angara (0, 1) and Trans-Baikal (3–5) mantle plumes at the latitude of 55°N; 2 – a location line of the central part of the near-surface graben-shaped zone of the Baikal rift system

на региональном геолого-геофизическом профиле А-В по широте $\phi = 55^{\circ}\text{N}$ в диапазоне долгот $\lambda = 80\text{--}120^{\circ}\text{E}$ и на высоте спутника $h = 450$ км и высоте аэростата $h = 30$ км.

Для определения глубины залегания особых точек магнитоактивных тел $d(\phi, \lambda, h)$, связанных с тектоническими структурами литосферы, измеренное на искусственном спутнике Земли MAGSAT в качестве суммарного магнитного поля модуля $B_s(\phi, \lambda, h)$ и вертикальной $Z_s(\phi, \lambda, h)$, горизонтальной $H_s(\phi, \lambda, h)$ составляющих полного вектора индукции, в которые входят магнитные поля, связанные с разными физическими источниками, было сначала разделено на части:

$$B_s(\phi, \lambda, h) = B_o(\phi, \lambda, h) + \\ + B_m(\phi, \lambda, h) + B_e(\phi, \lambda, h) + dT(\phi, \lambda, h); \quad (2)$$

$$Z_s(\phi, \lambda, h) = Z_o(\phi, \lambda, h) + \\ + Z_m(\phi, \lambda, h) + Z_e(\phi, \lambda, h) + Z_a(\phi, \lambda, h); \quad (3)$$

$$H_s(\phi, \lambda, h) = H_o(\phi, \lambda, h) + \\ + H_m(\phi, \lambda, h) + H_e(\phi, \lambda, h) + H_a(\phi, \lambda, h), \quad (4)$$

где $B_o(\phi, \lambda, h) + B_m(\phi, \lambda, h) + B_e(\phi, \lambda, h)$ – сумма дипольного $B_o(\phi, \lambda, h)$, недипольного $B_m(\phi, \lambda, h)$ и $B_e(\phi, \lambda, h)$ магнитных полей, которые образуют «нормальное» магнитное поле Земли (сформированное электромагнитными источниками, расположенными во внешнем ядре Земли), вычисленная по методике сферического гармонического анализа [5, 6]; $dT(\phi, \lambda, h)$, $Z_a(\phi, \lambda, h)$, $H_a(\phi, \lambda, h)$ – модуль и вертикальная и горизонтальная составляющие аномального магнитного поля в зависимости от географических широты ϕ и долготы λ , а также высоты полета спутника или аэростата h .

²Карта аномального магнитного поля территории СССР. М-б 1:2500000 / ред. З. А. Макарова. М.: Изд-во Мингео СССР, 1977.



Использованные методы интерпретации позволяют без привлечения априорной информации определять морфологические параметры магнитных зон от тектонических разломов: глубину залегания особых точек магнитоактивных тел $d(\phi, \lambda, h)$, горизонтальные размеры этих тел, а также глубину залегания точек изменения углов наклона магнитных зон от тектонических разломов с глубиной их проникновения в мантию. Высокая точность метода подтверждается не менее, чем 75 %-м совпадением выделенных вдоль исследуемого профиля А-В глубинных разломов по данным аномального магнитного поля с разломами, трассируемыми по наземным геолого-геофизическим данным на карте разломных структур³.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проверки надежности методики дифференциальной магнитометрии [8, 9] как одного из методов исследования аэромагнитных данных приведем результаты математической обработки региональных аэростатных и спутниковых магнитных измерений поля вдоль профиля А-В (см. рис. 3), пересекающего почти всю территорию Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов и соседних с ними регионов.

Использованные нами дифференциальные методы анализа магнитного поля позволяют без привлечения априорной информации определять положение особых точек некоторых геологических тел, близких по своим морфологическим параметрам к электромагнитным зонам, создаваемым глубинными тектоническими разломами литосферы в данном районе. Положение данных точек, в свою очередь, позволяет определять субгоризонтальные и субвертикальные размеры зон трещиноватости и дробления тектонических разломов и некоторые магнитные характеристики горных пород в пределах этих зон. Высокая надежность дифференциальных методов

анализа аэростатных данных подтверждается почти 75 %-м совпадением выделенных по данным аномального магнитного поля электромагнитных зон глубинных разломов с разломами, трассируемыми по наземным геологическим материалам на карте разломных тектонических структур⁴.

Исследуемый транссибирский геолого-геофизический профиль А-В (см. рис. 3, рис. 4, а), имеющий значительную протяженность около 2500 км, является одним из серии профилей многоуровневых аэростатных магнитных измерений и практически пересекает с запада на восток тектонические структуры в пределах расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Ко всему прочему, профиль А-В пересекает в пределах этих регионов целый ряд разновозрастных тектонических элементов, которые по-разному отражаются в пространственной структуре аномального магнитного поля, а также влияют на результаты его физико-математической обработки. Пересекающий Сибирский кратон геолого-геофизический разрез вдоль транссибирского профиля А-В (см. рис. 4, б), составленный на основе полученных результатов физико-математической обработки данных измерения многоуровневых значений аномального магнитного поля [4, 7–10] и дополненный материалами некоторых других работ⁵ [12–14], приведен на рис. 4.

Все сведения о тектонике фундамента земной коры вдоль рассматриваемого профиля А-В были получены путем совместной интерпретации материалов многоуровневой аэростатной и спутниковой магнитных съемок (см. рис. 4, а) и других наземных геофизических данных⁶ [12–16]. При этом предполагалось, что региональная пространственная структура и амплитуда этих полей определяется в основном несколькими факторами:

- 1) рельефом поверхности консолидированного магнитоактивного фундамента земной коры (верхняя субгоризонтальная граница В) (см. рис. 4, б);

³Схема зон глубинных разломов территории СССР. М-6 1:10000000 / сост. Е. М. Ананьева [и др.]; ред. Д. М. Мильштейн. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1977.

⁴Там же.

⁵Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).

⁶Там же.

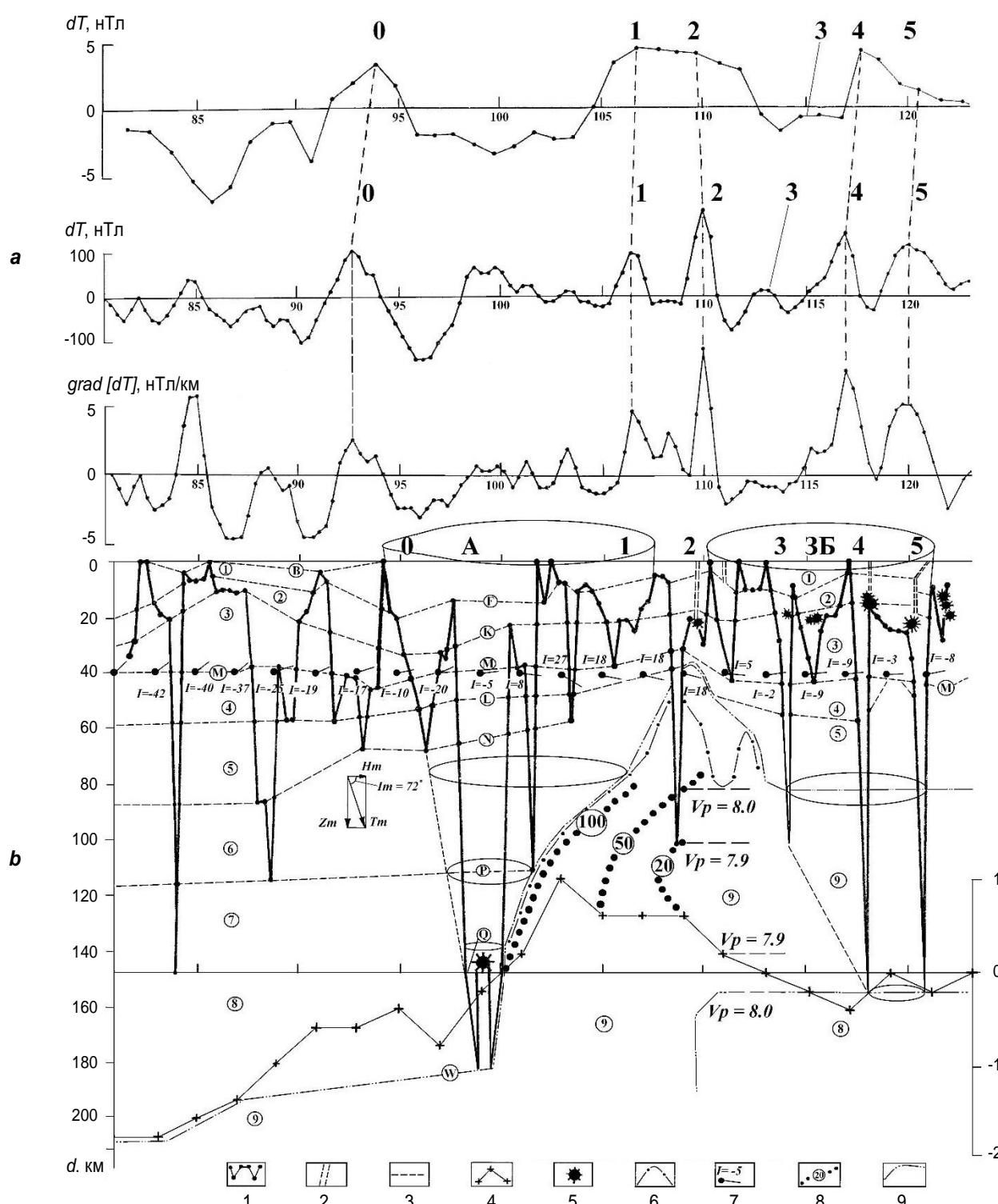


Рис. 4. Результаты геолого-геофизической интерпретации аэростатной и спутниковой магнитной съемки вдоль профиля А-В, пересекающего террииторию расположения Ангарского (А) и Забайкальского (ЗБ) мантийных плюмов, а также Байкальской рифтовой зоны (2) по 55-му градусу северной широты:
а – графики значений аномального магнитного поля $dT(\phi, \lambda, h)$, измеренного на высотах спутника MAGSAT ($h = 450$ км – верхняя кривая) и высотах аэростата ($h = 30$ км – средняя кривая), и график градиента ($\text{grad } dT$) аномального магнитного поля, измеренного на аэростате ($h = 30$ км – нижняя кривая);
б – геологово-геофизический разрез земной коры и литосферы, построенный в результате физико-математической обработки аэростатных и спутниковых данных аномального магнитного поля и других геофизических данных [12, 13]: 1 – границы (особые точки) электромагнитных зон, связанных с глубинными тектоническими разломами; 2 – местоположение субвертикальных глубинных тектонических разломов



(Баргузинский, Икатский, Каларский, Олекминский и др.), выделенных по наземным геолого-геофизическим данным [12]; 3 – расположение субгоризонтальных глубинных границ (B – нижняя граница осадочного слоя, F – граница Форша, K – граница Конрада, M – граница Мохоровичича) и других границ (L, N, P, Q, W) различных магнитоактивных слоев литосферы (название по [13]), рассчитанных по аэростатным магнитным данным: слои земной коры: (1) – «метаморфический», (2) – «гранитоидный», (3) – «габбро-гранулитовый»; слои «нормальной» высокоскоростной «холодной» мантии: (4) – «эклогитовый», (5) – «толеитовый», (6) – «перидотитовый», (7) – «плагиоклаз-пиролитовый», (8) – «пироксен-пиролитовый»; слой «аномальной» низкоскоростной «горячей» мантии: (9) – «гранат-пиролитовый» (по сейсмическим данным изолинии скорости продольных волн $V_p = 8 - 7,9 - 8 \text{ км/с}$) [14]; 4 – кривая изменений нормированных значений магнитного импеданса (Z_a/H_a), рассчитанного по спутниковым компонентным магнитным данным; 5 – место расположения гипоцентров землетрясений⁷, расположенных в основном в зонах тектонических разломов, произошедших в окрестности исследуемого профиля А-В; 6 – глубина и пространственное расположение изолинии температуры 1200°C в пределах Байкальской рифтовой зоны [15]; 7 – стрелками показано направление, а цифрой под ней – значение аномального магнитного наклонения (например, $I = 18^\circ$), рассчитанного вдоль широтного профиля А-В по спутниковым компонентным (Z_a, H_a) магнитным данным; 8 – глубина и пространственное расположение изолиний удельного электрического сопротивления и их значение 20, 50, 100 $\Omega\text{м}$ в пределах Байкальской рифтовой зоны [16]; 9 – глубина и пространственное расположение границы ($d = 50-200 \text{ км}$) зоны аномальных геоэлектрических, температурных и сейсмических значений в мантии в пределах Байкальской рифтовой зоны и Забайкальского мантийного плюма

Fig. 4. Results of geological and geophysical interpretation of balloon and satellite magnetic surveys along the A-B profile crossing the territory of the Angara (A) and Trans-Baikal (ЗБ) mantle plumes and the Baikal Rift zone (2) at the latitude of 55°N :

a – graphs of the values of the anomalous magnetic field $dT(\phi, \lambda, h)$ measured at the MAGSAT satellite heights ($h = 450 \text{ km}$ – upper curve) and the balloon heights ($h = 30 \text{ km}$ – middle curve), and the gradient graph (grad dT) of the anomalous magnetic field measured on the balloon ($h = 30 \text{ km}$ is the lower curve)

The values of the geographical longitude λ are shown along the horizontal axes of the graphs;

b – geological and geophysical section of the Earth's crust and lithosphere constructed as a result of physical and mathematical processing of balloon and satellite data of the anomalous magnetic field and other geophysical data [12, 13]:

1 – boundaries (special points) of electromagnetic zones associated with deep tectonic faults; 2 – location of sub-vertical deep tectonic faults (Barguzinsky, Ikatsky, Kalarsky, Olekminsky et al.) identified by ground-based geological and geophysical data [12]; 3 – location of the subhorizontal deep boundaries (B – the lower boundary of the sedimentary layer, F – Forsch boundary, K – Conrad boundary, M – Mohorovicic boundary and other boundaries (L, N, P, Q, W)

of various magnetic active layers of the lithosphere (named according to [13]), calculated on the basis of balloon magnetic data: layers of the Earth crust: (1) – "metamorphic", (2) – "granitoid", (3) – "gabbro-granulite"; layers of "normal" high-velocity "cold" mantle: (4) – "eclogite", (5) – "tholeiite", (6) – "peridotite", (7) – "plagioclase-pyrolytic", (8) – "pyroxene-pyrolytic"; layer of "anomalous" low-velocity "hot" mantle: (9) – "garnet-pyrolytic" (according to seismic data the isolines of longitudinal wave velocities refer as $V_p = 8 - 7,9 - 8 \text{ km/s}$) [14]; 4 – variation curve of the normalized values of the magnetic impedance (Z_a/H_a) calculated on the basis of satellite component magnetic data; 5 – areas of earthquake hypocenters⁷ locations mainly in the zones of tectonic faults occurred in the vicinity of the studied profile A-B; 6 – depth and spatial location of the 1200°C temperature isoline within the Baikal rift zone [15]; 7 – arrows show the direction,

the figure below it shows the value of the anomalous magnetic inclination (e. g., $I = 18^\circ$) calculated along the A-B east-west profile according to the satellite component (Z_a, H_a) magnetic data; 8 – depth and spatial location of the specific electrical resistivity isolines and their values of 20, 50, 100 $\Omega\text{м}$ within the Baikal rift zone [16]; 9 – depth and spatial location of the boundary ($d = 50-200 \text{ km}$) of the zone of anomalous electrical, temperature and seismic values in the mantle within the Baikal rift zone and the Trans-Baikal mantle plume

2) рельефом поверхности субгоризонтальной границы, расположенной приблизительно на глубине 10 км, примерно совпадающей с сейсмоактивной границей Форша F (см. рис. 4, b);

3) вариациями магнитных ($M(x)$) свойств горных пород земной коры, отражающими вариации вещественного состава и наличие вы-

сокоминерализованных растворов [16] в различных слоях земной коры (см. рис. 4, b, слои (1)–(7));

4) рельефом поверхности субгоризонтальных границ в разрезе земной коры, например границ Конрада K и Мохоровичича M , а также других нижележащих границ литосферы (L, N, P, Q, W) (см. рис. 4, b);

⁷ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).



5) вариациями температуры [15] и, соответственно, вариациями удельного электрического сопротивления [16] глубинных неоднородностей (слои (5)–(9)) мантии ($d = 50$ – 200 км) (см. рис. 4, b);

6) магнитоактивными зонами глубинных тектонических разломов литосферы (см. рис. 4, b).

Все эти факторы могут быть учтены посредством использования различных методов решения прямой [4, 7] и обратной [5, 6, 8–11] задач магнитного потенциала. Для определения сложного рельефа различных границ литосферы ($B, F, K, M, L, N, P, Q, И$), разбитой разломными тектоническими структурами, использовались алгоритмы программ для электронно-вычислительных машин типа IBM PC/AT на языке ФОРТРАН-99. Эти алгоритмы частично изложены в источниках [4–11].

На разрезе (см. рис. 4, b) часть этих тектонических разломов пересекает всю земную кору в целом и своими «корнями» уходит в верхнюю мантию Земли. Некоторые тектонические разломы упираются своими «корнями» в подошвы слоев земной коры (поверхность Мохоровичича M). Часть выделенных по аэростатным и спутниковым данным субгоризонтальных границ ($B, F, K, M, L, N, P, Q, И$) геолого-геофизического разреза А-В маркируется особыми точками (см. рис. 4, b). При этом можно подтвердить, что значительная часть глубинных характеристик субвертикальных электромагнитных зон разломных тектонических структур, а также расположение субгоризонтальных границ слоев, приведенных на данном разрезе литосферы, подтверждается наземными геолого-геофизическими данными⁸ [12–16]. В результате в соответствии с источником [13] предлагаются классифицировать разломные тектонические структуры, представленные на приведенном разрезе литосферы (см. рис. 4, b), по их глубине расположения хотя бы на несколько видов по числу основных структурных комплексов литосферы:

– слои земной коры: (1) «метаморфический», (2) «гранитоидный», (3) «габбро-базитовый»;

– слои так называемой нормальной высокоскоростной холодной литосферы: (4) «эклогитовый», (5) «толеитовый», (6) «перидотитовый», (7) «плагиоклаз-пиролитовый», (8) «пироксен-пиролитовый»;

– слой так называемой аномальной низкоскоростной горячей мантии: (9) «гранат-пиролитовый».

Из вертикального геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, b), построенного в первую очередь по аэростатным и спутниковым магнитным данным, видно, что «корни» субвертикальных разломных тектонических структур примерно совпадают с глубинными субгоризонтальными границами поверхностей Форша F ($d_F \approx 10$ км), Конрада K ($d_K \approx 20$ км), Мохоровичича M ($d_M \approx 40$ км), а также другими границами L ($d_L \approx 60$ км), N ($d_N \approx 70$ – 80 км), P ($d_P \approx 120$ км), Q ($d_Q \approx 150$ км), W ($d_W \approx 200$ км). Таким образом, можно сделать вывод, что данная методика выделения субгоризонтальных границ литосферы по особым точкам магнитоактивных тел работает в пределах не только платформенных, но также и геосинклинальных регионов Сибирского кратона, коим является Ангаро-Байкальский регион.

Из данных, приведенных на глубинном геолого-геофизическом разрезе (см. рис. 4, b), видно, что наблюдается соответствие глубинных разломных тектонических структур (по наземным данным) с результатами выделенных электромагнитных глубинных зон разломов литосферы по аэростатным и спутниковым магнитным данным.

Другое направление региональных геофизических исследований глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов связано с использованием спутниковых геофизических данных. Результаты анализа спутниковых компонентных (X, Y, Z, H, D, I) магнитных данных вдоль регионального геолого-геофизического профиля (см. рис. 4, b), пересекающего также регион Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, частично проанализированы в источниках [4, 7]. Полученные по результатам анализа аномального магнитного поля спутника MAGSAT данные

⁸ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).



показывают, что выявляются не только постоянные геолого-тектонические границы литосферы, но и динамические границы, которые могут быть связаны с геоэлектрическими [16], сейсмологическими [14] и геотермальными [15] процессами, происходящими в исследуемом регионе.

Из геолого-геофизического разреза по широтному профилю А-В (см. рис. 4, *b*) видно, что глубина литосферы в пределах Ангарского мантийного плюма (см. рис. 4, *b*, зоны 0–1) составляет около 180 км. Забайкальская часть (см. рис. 4, *b*, зоны 3–5) Сибирского края (Забайкальский мантийный плюм (110–120 °E), расположенный на востоке от Ангарского мантийного плюма (94–108 °E)), в соответствии со схемой (см. рис. 3), составленной по карте аномального магнитного поля и отображающей кольцевые зоны интенсивных магнитных аномалий 3–5 (см. рис. 3), а также с графиками интенсивных (100–150 нТл) аэростатных магнитных аномалий 3–5 (см. рис. 4, *a*), по-видимому, связана с магматическими внедрениями, поступающими из аномально разогретой мантии в Байкальской рифтовой зоне по соседним тектоническим разломам (Баргузинский, Икатский) в приповерхностные зоны земной коры⁹ [16]. Глубина тектонических разломов (Туколамский, Тунгирский) в регионе Забайкальского мантийного плюма достигает почти 150 км, что соответствует независимым геофизическим данным [2] о вертикальной мощности литосферы в этом регионе (см. рис. 2).

Из геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, *b*) также можно видеть, что направление вектора (\rightarrow) наклонения (например, $I = -20^\circ$), рассчитанного по данным аномального магнитного поля, в зонах тектонических разломов в пределах Ангарского мантийного плюма (94–101 °E) направлено в верхнюю полуплоскость и при этом не совпадает с направлением наклонения «нормального» магнитного поля ($I_m = +72^\circ$), вектор которого направлен в нижнюю полуплоскость. Значение наклонения $I_m(x)$ главного магнитного

поля было определено по следующей формуле¹⁰:

$$I_m(\phi, \lambda, h) = \arctg[Z_m(\phi, \lambda, h) / H_m(\phi, \lambda, h)] = 72^\circ, \quad (5)$$

где $Z_m(\phi, \lambda, h)$ и $H_m(\phi, \lambda, h)$ – значения вертикальной и горизонтальной составляющих «нормального» магнитного поля Земли в районе Байкальской рифтовой зоны, которые были определены по измеренным данным искусственного спутника Земли MAGSAT.

При этом из геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, *b*) видно, что векторы (\rightarrow) аномального наклонения ($I = 18$) в зонах тектонических разломов в пределах расположения глубинной части Байкальской рифтовой структуры (101–113 °E) в основном направлены в нижнюю полуплоскость и совпадают по знаку с направлением наклонения современного главного магнитного поля ($I_m = +72^\circ$) в этой части разреза по исследуемому профилю А-В. Таким образом, направления наклонения, рассчитанного по данным аномального магнитного поля, в пределах территории большей части Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов могут быть связаны с преимущественно остаточно намагниченными горными породами «нормальной» мантии, сформировавшимися в другую геохронологическую эпоху, имеющими противоположное по знаку направление наклонения главного магнитного поля Земли $I_m(\phi, \lambda, h)$. В противоположность этому значения наклонения, рассчитанного по данным аномального магнитного поля, в пределах глубинной части Байкальской рифтовой структуры (101–113 °E), где преобладают породы аномальной по значениям температуры мантии ($T = 1200^\circ\text{C}$) [15, 16], по-видимому, могут быть связаны с индуктивно намагниченными породами, соответствующими по знаку современному наклонению главного магнитного поля.

До недавнего времени в направлении академической науки (земной магнетизм¹¹) существовало устойчивое мнение, что большая часть всех ферромагнитных минералов с

⁹ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).

¹⁰ Яновский Б. М. Земной магнетизм: учеб. пособие / ред. В. В. Металлова. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

¹¹ Там же.



остаточной намагниченностью J_o теряет свои ферромагнитные (сильные магнитные) свойства и переходит в парамагнетики с очень слабыми магнитными свойствами, когда температура в недрах Земли превышает свою определенную критическую температуру Кюри (для чистого железа $\Theta = 1073$ °К), которая для каждой отдельной разновидности магнитных минералов (титаномагнетит, магнетит, гематит, маггемит, ильменит и многие другие) в составе горных пород значительно меньше ($\Theta = 350$ – 600 °С). Поэтому мы предполагаем, что наблюдаемые на спутнике и аэростате магнитные поля, вызванные магнитоактивными источниками на большой глубине, значительно превышающей глубину расположения в земной коре температур больших, чем температура Кюри ($\Theta = 350$ – 600 °С), могут быть связаны с индуктивно намагниченными горными породами, которые продолжают создавать аномальное магнитное поле dT даже при высоких температурах ($\Theta > 600$ °С) подобно тому, как это обычно представляется¹² относительно источников «нормального» магнитного поля во внешнем ядре Земли. Согласно первому закону Релея¹³, суммарная намагниченность J_s включает индуктивную J_u и остаточную J_o намагниченность ферромагнитных минералов в горных породах магнитоактивного тела:

$$J_s = J_u + J_o = (k \cdot dT) + (b_i \cdot dT^2), \quad (6)$$

где k – магнитная восприимчивость горных пород; dT – действующее магнитное поле; b_i – коэффициент размагничивания, характерный для определенной формы магнитоактивного тела.

Согласно существующим воззрениям¹⁴, мы предполагаем, что при температурах магнитоактивных минералов (титаномагнетит, магнетит, маггемит, ильменит и др.) больших, чем температура Кюри, в горных породах Ангаро-Байкальского региона, расположенных на глубинах более 40 км (граница Мохо), остаточная намагниченность J_o ферромагнитных минералов почти пропадает. В связи с этим, в соответствии с формулой (6), горные

породы на этих глубинах должны обладать только индуктивной намагниченностью J_u , формирующей измеряемые магнитные поля.

Поскольку основной вклад в формирование измеряемых полей вносит индуктивная намагниченность $J_u = k \cdot dT$, линейно связанная с измеренным аномальным магнитным полем dT , а магнитная восприимчивость k – величина скалярная, предполагается, что угол наклона (направление) вектора индуктивной намагниченности J_u будет очень близок к направлению (наклону) вектора самого аномального магнитного поля, определяемого по формуле¹⁵

$$dT = Z_a \cdot \sin I + H_a \cdot \cos I \cdot \cos f, \quad (7)$$

где $f = 90^\circ$ – угол между вектором dT и магнитным меридианом на широтном профиле А-В. В этом случае в формуле (7) величина $\cos f = 0$.

Тогда формулу (7) можно переписать как

$$dT = Z_a \cdot \sin I. \quad (8)$$

Используя соотношение (8) и принимая величину магнитной восприимчивости k , характерную для магнетита, можно определить значение индуктивной намагниченности в нижней части широтной плоскости как

$$J_u = k \cdot dT = k \cdot Z_a \cdot \sin I, \quad (9)$$

где угол наклона вектора индуктивной намагниченности J_u определяется в основном углом наклона вектора аномального магнитного наклонения I , расположенного в широтной плоскости прохождения профиля А-В:

$$I = \arcsin (Z_a / dT). \quad (10)$$

Значения магнитного наклонения I вдоль исследуемого регионального геолого-геофизического профиля А-В определялись для территории Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов с интервалом дискретности через два градуса по долготе λ вдоль широтного профиля по 55-му градусу северной широты ($d\lambda = 2^\circ = 125$ км) согласно спутниковым (искусственный спутник Земли MAGSAT) векторным (компонентным $Z_a(\phi, \lambda, h)$, $H_a(\phi, \lambda, h)$) данным аномального магнитного поля исходя из формул (11)–(12). Тогда типичное значение в центральной части территории Ангарского

¹² Яновский Б. М. Земной магнетизм: учеб. пособие / ред. В. В. Металлова. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

¹³ Там же.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Там же.



мантийного плюма (хоть эти значения и достаточно разные) можно определить для широты $\phi = 55^\circ$ профиля А-В как

$$I(\phi, \lambda, h) = \arcsin[Z_a(\phi, \lambda, h)] / dT_a(\phi, \lambda, h) = 18^\circ \text{ для } \lambda = 94\text{--}108^\circ\text{E}, \quad (11)$$

а типичное значение в центральной части территории Забайкальского мантийного плюма – как

$$I(\phi, \lambda, h) = \arcsin[Z_a(\phi, \lambda, h)] / dT_a(\phi, \lambda, h) = -9^\circ \text{ для } \lambda = 110\text{--}120^\circ\text{E}. \quad (12)$$

Полученные данные о влиянии аномальной по геоэлектрическим и температурным параметрам мантии в зоне расположения глубинной части Байкальской рифтовой структуры подтверждаются положительными значениями на кривой изменения величины магнитного импеданса $I_{mp}(\phi, \lambda, h)$, рассчитанного по данным спутникового аномального магнитного поля (кривая в условных обозначениях под номером 4), приведенной в нижней части геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, b). В среднем значение магнитного импеданса колеблется от 0 до +1:

$$I_{mp}(\phi, \lambda, h) = [Z_a(\phi, \lambda, h) / H_a(\phi, \lambda, h)] = 0,5, \quad (13)$$

где $Z_a(\phi, \lambda, h)$, $H_a(\phi, \lambda, h)$ и $I_{mp}(\phi, \lambda, h)$ – значения, полученные по данным измеренных на спутнике вертикальной и горизонтальной составляющих вектора индукции аномального магнитного поля и рассчитанных по ним значений магнитного импеданса. Аналогично вычисляются значения магнитного импеданса для других точек расчета.

С появлением новых работ показано, что выявлены температурно-устойчивые разновидности магнетитовых пород (гематит) [17], не теряющие своих магнитных свойств (свойств остаточной намагниченности) даже в верхней мантии до глубины более 600 км, где температуры достигают значений 1300 °К. Поэтому можно предполагать, что какая-то (не очень большая) часть магнитного поля может быть вызвана этими температурно-устойчи-

выми горными породами мантии с преобладающей в них остаточной намагниченностью.

Геоэлектрические данные удельного сопротивления (20–100 Ом·м) аномальной мантии в глубинной зоне расположения Байкальской рифтовой структуры (ниже границы Мордовича (примерная глубина $d_m > 40$ км)) косвенно свидетельствуют о высоких значениях температуры аномальной мантии (порядка 1200 °C) [15, 16] (см. рис. 4, b). Высокие значения температуры мантии в зоне Байкальской рифтовой структуры и частично в бортовых зонах Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов и их «дочерних» кольцевых структур меньшего размера подтверждаются значениями геотермальной энергии, представленными на соответствующей карте (рис. 5).

Ранее было показано [18], что многие месторождения газообразных и жидких углеводородов (природный газ, газоконденсаты, нефть) расположены в зонах мантийных плюмов. В связи с этим был проведен поиск возможных месторождений полезных ископаемых в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Предварительно были рассмотрены различные опубликованные данные о существующих месторождениях полезных ископаемых^{16,17} в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Оказалось, что основными месторождениями, которые расположены в зоне Ангарского мантийного плюма, являются угольные месторождения¹⁸, а в зоне Забайкальского мантийного плюма – урановые месторождения¹⁹. Карты месторождений различных полезных ископаемых, расположенных в том числе и в зоне обоих – Ангарского и Забайкальского – мантийных плюмов, представлены на рис. 6 и 7.

Из рис. 7 можно видеть, что значительная часть месторождений урана (Аргунское, Жерловское, Стрельцовское) Российской Федерации с запасами 5–20 тыс. т расположена в зоне

¹⁶ Карта полезных ископаемых территории СССР / Л. Н. Колосова. М.: Изд-во ГУГК, 1982.

¹⁷ Карта урановых месторождений России // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/mining/uran/uran.jpg> (03.03.2022).

¹⁸ Карта полезных ископаемых территории СССР / Л. Н. Колосова. М.: Изд-во ГУГК, 1982.

¹⁹ Карта урановых месторождений России // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/mining/uran/uran.jpg> (03.03.2022).

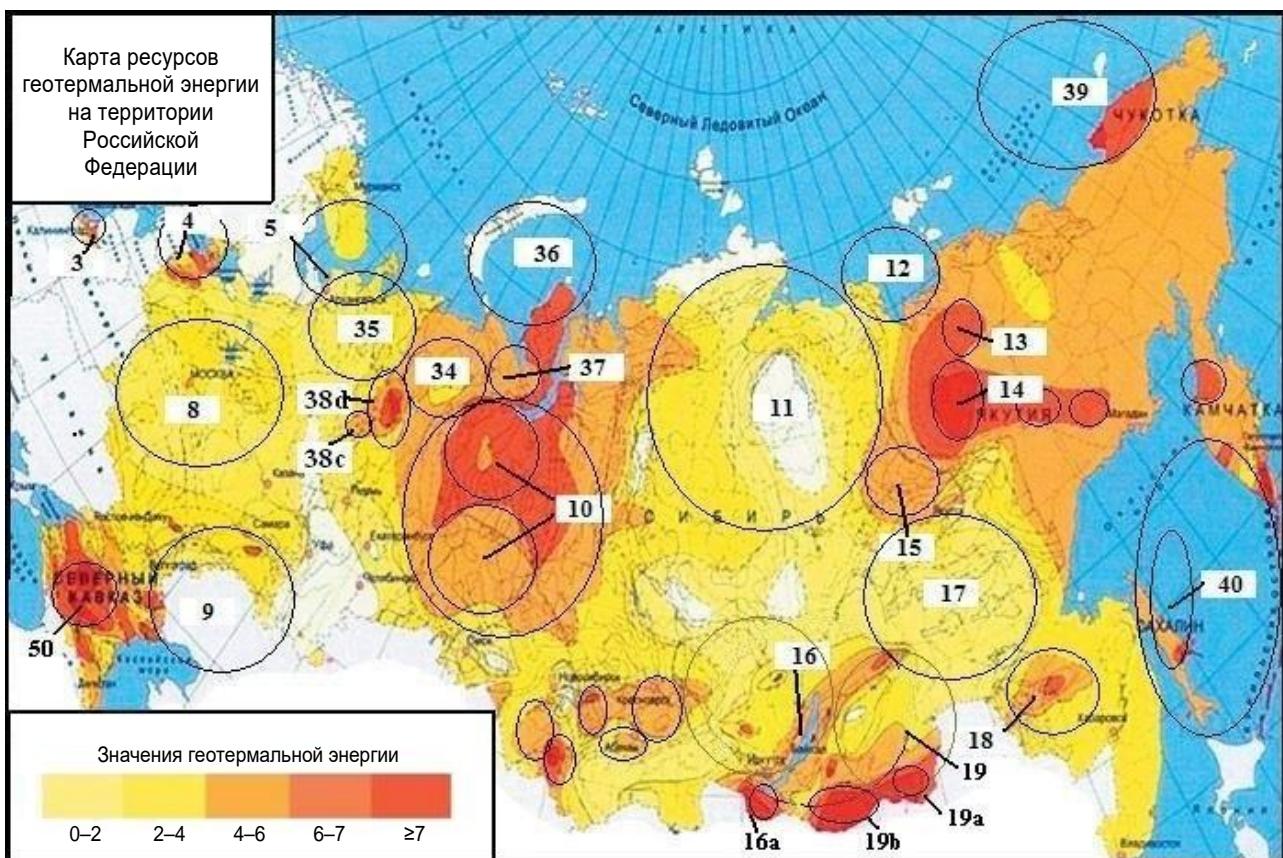


Рис. 5. Карта ресурсов геотермальной энергии Российской Федерации²⁰

Значения геотермальной энергии приведены в тоннах условного топлива
на кубический метр (цветовые обозначения от 0 до 7)

Контуры расположения колецевых структур Сибирского кратона, связанных с мантийными плюмами:
11 – Анабарской; 11а – Тунгусской; 16 – Ангарской; 16а – «дочерней» от Ангарской; 17 – Алдано-Становой;
19 – Забайкальской; 19а, 19б – «дочерних» от Забайкальской

Fig. 5. Map of geothermal energy resources of the Russian Federation²⁰

The values of geothermal energy are given in tons of the oil equivalent per a cubic meter (color designations from 0 to 7)

Location contours of the ring structures of the Siberian craton associated with mantle plumes:

11 – Anabar; 11a – Tunguska; 16 – Angara; 16a – Angara "daughter" structure; 17 – Aldano-Stanovaya;
19 – Trans-Baikal; 19a, 19b – Trans-Baikal "daughter" structure

Забайкальского мантийного плюма и его «дочерних» (ближкорасположенных) плюм-тектонических структур меньших размеров. Также из рис. 7 видно, что многие месторождения урана связаны с горными породами докембрийского возраста, поэтому можно предположить, что наиболее активная фаза формирования Забайкальского мантийного плюма (и образования урановых месторождений) происходила в докембрийский геохронологический период геолого-тектонической эволюции Земли. В связи с этим для поисков новых месторождений урана большое значение может иметь возраст (докембрийский) формирова-

ния мантийного плюма, характерный для наиболее древних горных пород Забайкальского мантийного плюма, на территории которого расположены основные разведанные в России месторождения урана. В свою очередь, находящийся рядом Ангарский мантийный плюм, судя по самым древним породам ордовикского возраста, расположенным в его пределах, сформировался в доордовикский геохронологический период, но месторождений урана в его пределах пока не найдено. Кроме того, тектонические разломы в пределах территории Забайкальского мантийного плюма уходят своими «корнями» в зону так называемой

²⁰ Карта прогнозных ресурсов геотермальной энергии // Камчатский научный центр ДО РАН. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kscnet.ru/ivs/publication/kuril_kam2005/title4.jpg (03.03.2022).

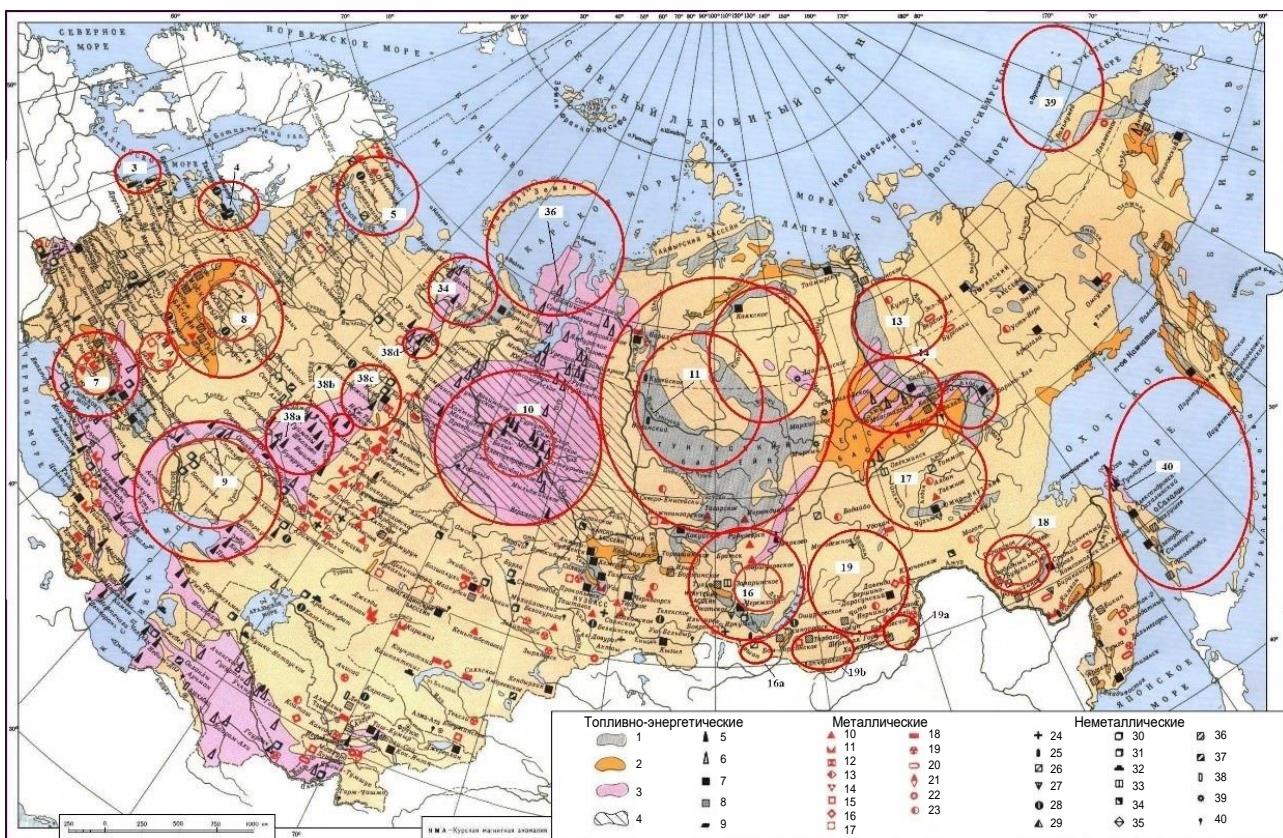


Рис. 6. Карта месторождений полезных ископаемых Российской Федерации²¹

Контуры расположения кольцевых структур Сибирского кратона, связанных с одноименными мантийными плюмами: 11а – Тунгусской (Тунгусский угольный бассейн); 16 – Ангарской (Иркутский угольный бассейн); 16а – Слюдянской (месторождения слюды); 17 – Алдано-Становой (Южно-Якутский угольный бассейн); 19 – Забайкальской (Нерчинские золоторудные месторождения); 19а – Березовской (месторождения золотоносных, полиметаллических и железных руд); 19б – Тарбаганской (месторождения вольфрамовых и полиметаллических руд)

Ресурсы: 1–9 – топливно-энергетические: 1 – площади залегания каменного угля, 2 – площади залегания бурого угля, 3 – нефтегазоносные площади, 4 – площади залегания торфа (заторфованность более 10 %), 5 – нефть, 6 – природный газ, 7 – каменный уголь, 8 – бурый уголь, 9 – горючие сланцы; 10–23 – металлические: 10 – железные руды, 11 – марганцевые руды, 12 – хромитовые руды, 13 – титановые руды, 14 – никелевые руды, 15 – вольфрамовые руды, 16 – молибденовые руды, 17 – алюминиевые руды, 18 – медные руды, 19 – полиметаллические руды, 20 – оловянные руды, 21 – сурьмяные руды, 22 – ртутные руды, 23 – золото; 24–40 – неметаллические: 24 – асBEST, 25 – графит, 26 – слюда, 27 – тальк, 28 – фосфориты и апатиты, 29 – сера, 30 – калийные соли, 31 – поваренная соль, 32 – глауберова соль, 33 – гипс, 34 – каолин, 35 – облицовочные камни, 36 – глины оgneупорные, 37 – глины бентонитовые, 38 – цементное сырье, 39 – алмазы; 40 – источники минеральных вод

Fig. 6. Map of mineral deposits of the Russian Federation²¹

Location contours of the ring structures of the Siberian craton associated with similar mantle plumes: 11a – Tunguska (Tunguska coal basin); 16 – Angara (Irkutsk coal basin); 16a – Slyudyanka (mica deposits); 17 – Aldano-Stanovoy (South Yakut coal basin); 19 – Trans-Baikal (Nerchinsk gold deposits); 19a – Berezovskaya (deposits of gold-bearing, polymetallic and iron ores); 19b – Tarbagans (deposits of tungsten and polymetallic ores)

Resources: 1–9 – fuel and energy: 1 – coal occurrence areas, 2 – brown coal occurrence areas, 3 – oil and gas bearing areas, 4 – peat occurrence areas (peat content is more than 10 %), 5 – oil, 6 – natural gas, 7 – bituminous coal, 8 – brown coal, 9 – bituminous shale; 10–23 – metal: 10 – iron ores, 11 – manganese ores, 12 – chromite ores, 13 – titanium ores, 14 – nickel ores, 15 – tungsten ores, 16 – molybdenum ores, 17 – aluminum ores, 18 – copper ores, 19 – polymetallic ores, 20 – tin ores, 21 – antimony ores, 22 – mercury ores, 23 – gold; 24–40 – non-metallic: 24 – asbestos, 25 – graphite, 26 – mica, 27 – talc, 28 – phosphorites and apatites, 29 – sulfur, 30 – potassium salts, 31 – sodium salt, 32 – Glauber's salt, 33 – gypsum, 34 – kaolin, 35 – facing stones, 36 – refractory clays, 37 – bentonite clays, 38 – cement raw materials, 39 – diamonds; 40 – sources of mineral waters

²¹ Карта полезных ископаемых территории СССР / Л. Н. Колосова. М.: Изд-во ГУГК, 1982.

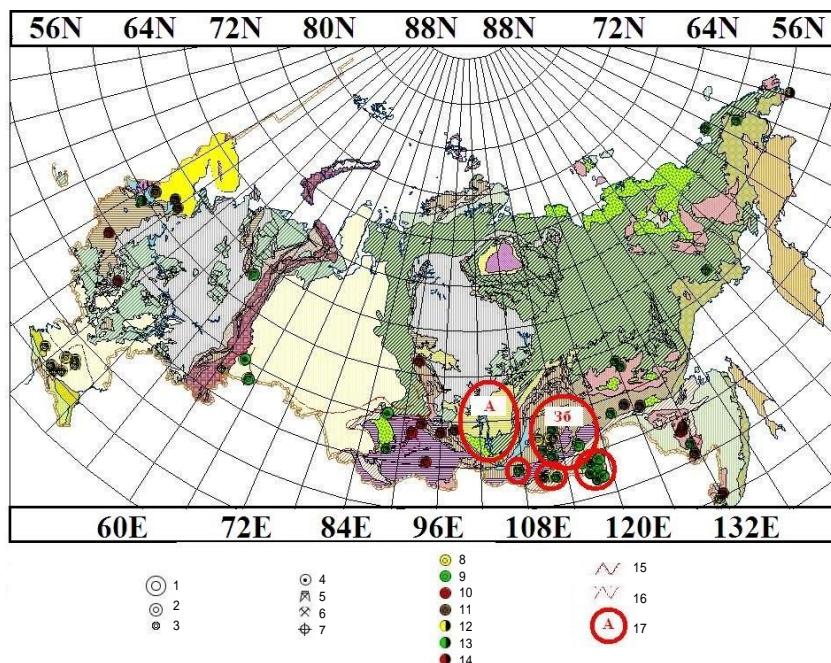


Рис. 7. Карта урановых месторождений России²²:

1–3 – оцениваемые запасы урановых месторождений: 1 – более 20 тыс. т, 2 – от 5 до 20 тыс. т, 3 – менее 5 тыс. т; 4–7 – освоенность месторождений: 4 – находящиеся в стадии оценки, 5 – отнесенные в резерв, 6 – эксплуатируемые, 7 – отработанные; 8–14 – возраст оруденений: 8 – кайнозойский, 9 – мезозойский, 10 – палеозойский, 11 – докембрийский, 12 – кайнозойско-мезозойский, 13 – мезозойско-палеозойский, 14 – палеозойско-докембрийский; 15 – границы урановорудных районов; 16 – границы перспективных на уран районов; 17 – контуры расположения кольцевых структур Сибирского кратона, связанных с мантийными плюмами: А – Ангарской и «дочерней» Слюдянской структур, 3б – Забайкальской структуры и «дочерних» Тарбаганской и Березовской структур меньшего размера

Fig. 7. Map of uranium deposits in Russia²²:

1–3 – estimated reserves of uranium deposits: 1 – more than 20 thousand tons; 2 – from 5 to 20 thousand tons; 3 – less than 5 thousand tons; 4–7 – development of deposits: 4 – under evaluation; 5 – reserved; 6 – operated; 7 – abandoned; 8–14 – mineralization age: 8 – Cenozoic; 9 – Mesozoic; 10 – Paleozoic; 11 – Precambrian; 12 – Cenozoic-Mesozoic; 13 – Mesozoic-Paleozoic; 14 – Paleozoic-Precambrian; 15 – boundaries of uranium ore areas; 16 – boundaries of the areas promising for uranium; 17 – location contours of the ring structures of the Siberian craton associated with mantle plumes: A – Angara and the "daughter" Slyudanskaya structure; 3б – Trans-Baikal structure and "daughter" Tarbaganskaya and Berezovskaya structures of smaller scale

аномальной горячей низкоскоростной мантии (см. рис. 4, б, 9), из которой по этим разломам могли поступать магматические внедрения с наличием урановых руд. Тектонические же разломы в пределах территории Ангарского мантийного плюма уходят своими «корнями» в слои так называемой нормальной холодной высокоскоростной мантии, которая имеет другой геохимический состав и, по-видимому, очень бедна включениями урановых руд.

В настоящее время, когда возникли острые проблемы с энергетическими ресурсами во многих странах, появилась новая тенденция к развитию «зеленой» энергетики в Европе и Китае. В связи с этим актуальной явля-

ется задача поиска новых месторождений не только углеводородов (нефти, газа, угля), но и урана, так как атомные электростанции Европы также отнесены к направлению «зеленой» энергетики. Новые месторождения урана позволят в будущем усиленно развивать направление «зеленой» атомной энергетики в России и в дружественных странах, где уже построены отечественные атомные реакторы или только планируется их построение.

Заключение

Приведенные примеры, как представляется, свидетельствуют о высокой эффективности интерпретации спутниковых и аэростат-

²² Карта урановых месторождений России // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/mining/uran/uran.jpg> (03.03.2022).



ных данных аномального магнитного поля при изучении строения литосферы в зоне Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, пересекаемых профилем многоуровневых магнитных исследований. Приведем основные выводы проведенного исследования:

1. Показана возможность применения магнитных методов для исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов по данным аэростатных и спутниковых магнитных измерений.

2. По аэростатным и спутниковым магнитным данным выявлены некоторые глубинные тектонические разломы литосферы (Баргузинский, Икатский, Туколамский, Тунгирский), которые по особым точкам магнитоактивных зон этих разломов позволяют маркировать различные субгоризонтальные границы литосферных слоев в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов

вдоль регионального геолого-геофизического профиля А-В.

3. Выявлена пространственная взаимосвязь расположения месторождений угля и урана с кольцевыми морфологическими структурами, связанными с Ангарским и Забайкальским мантийными плюмами. Выявленные закономерности связи урановых месторождений с кольцевыми структурами мантийных плюмов, их геохронологическим возрастом формирования, геохимическим составом подстилающей их «горячей» низкоскоростной мантии и вследствие этого высоким тепловым потоком на поверхности Земли могут быть использованы для поиска новых перспективных регионов урановых месторождений в зонах расположения других крупных мантийных плюмов (Анабарского, Алдано-Станового) в пределах территории Сибирского кратона.

Список источников

1. Kharitonov A. L. Paleomagnetic anomalies of the sea-floor spreading – the result of the activity of plume-tectonic morphological structures of central type // Modern Science. 2018. Iss. 11. P. 8–11.
2. Чермак В. Геофизические поля, их природа и геологическая интерпретация // Геодинамика. 1986. Т. 5. № 2. С. 111–256.
3. Вольвовский И. С., Вольвовский Б. С. Разрезы земной коры территории СССР по данным глубинного сейсмического зондирования. М.: Советское радио, 1975. 265 с.
4. Цветков Ю. П., Белкин В. А., Канониди Х. Д., Харитонов А. Л. Физико-геологическая интерпретация аномального магнитного поля, измеренного в стратосфере // Физика Земли. 1995. № 4. С. 54–57.
5. Ротанова Н. М., Харитонов А. Л., Ан Ч. Спектральный анализ магнитного поля, измеренного на спутнике МАГСАТ // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 3. С. 101–107.
6. Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Frunze A. Kh. Anomaly crust fields from MAGSAT satellite measurements: their processing and interpretation // Annals of Geophysics. 2004. Vol. 47. Iss. 1. P. 179–190.
7. Цветков Ю. П., Ротанова Н. М., Харитонов А. Л. Повысотная структура магнитных аномалий по градиентным измерениям в стратосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 3. С. 412–418.
8. Пронин В. П., Харитонов А. Л. Использование разновысотных статистических характеристик аномального магнитного поля для оценки мощности магнитоактивного слоя земной коры // Физика Земли. 1994. № 7-8. С. 162–167.
9. Фонарев Г. А., Харитонов А. Л., Харитонова Г. П. Использование методов пространственно-временной магнитометрии для анализа магнитного поля, измерен-
- ного на спутнике «CHAMP» // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2007. № 2. С. 49–53.
10. Kharitonov A. L. Determination of magnetic body parameters, using spectral analysis of the anomalous magnetic field // Berlin: HHI-Report. 1987. Vol. 21. P. 99–106.
11. Харитонов А. Л. Геолого-геофизическая интерпретация данных анализа многоуровневых измерений геомагнитного поля и их сопоставление с особенностями разрезов глубинного сейсмического зондирования // Сейсмические технологии-2017: материалы науч.-практ. конф. М.: ООО «Издательство Полипресс», 2017. С. 250–252.
12. Щукин Ю. К. Геологические задачи региональных геофизических исследований // Геофизика. 1997. № 1. С. 12–19.
13. Ботт М. Внутреннее строение Земли / пер. с англ. М.: Мир, 1974. 373 с.
14. Алексеев А. С., Лаврентьев М. М., Нерсесов И. Л., Романов В. Г. Результаты изучения горизонтальных неоднородностей мантии по профилю Памир – Байкал // Математические проблемы геофизики. Вып. 2. М.: Наука, 1974. С. 143–157.
15. Любимова Е. А., Фельдман И. С. Тепловой поток, температура и электропроводность земной коры и верхней мантии // Кора и верхняя мантия Земли. М.: Наука, 1975. С. 117–132.
16. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.
17. Kupenko I., Aprilis G., Vasiukov D. M., McCammon C., Chariton S., Cerantola V. et al. Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths // Nature. 2019. Vol. 570. P. 102–106. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1254-8>.
18. Валяев Б. М. Углеводородная дегазация



Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П. Н. Кропоткина) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений

(к 100-летию со дня рождения акад. П. Н. Кропоткина): сб. ст. / ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валяев. М.: Геос, 2011. С. 10–32.

References

1. Kharitonov A. L. Paleomagnetic anomalies of the sea-floor spreading – the result of the activity of plume-tectonic morphological structures of central type. *Modern Science*. 2018;11:8-11. (In Russ.).
2. Chermak V. Geophysical fields, their nature and geological interpretation. *Geodinamika*. 1986;5(2):111-256. (In Russ.).
3. Vol'vovskii I. S., Vol'vovskii B. S. *Sections of the Earth's crust of the USSR territory according to deep seismic sounding data*. Moscow: Sovetskoe radio; 1975. 265 p. (In Russ.).
4. Tsvetkov Yu. P., Belkin V. A., Kanonidi Kh. D., Kharitonov A. L. Physico-geological interpretation of the anomalous geomagnetic field measured in the stratosphere. *Fizika Zemli*. 1995;4:54-57. (In Russ.).
5. Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Chang A. T. Spectral analysis of the magnetic field measured onboard the MAGSAT satellite. *Geomagnetism i aeronomiya*. 1999;39(3):101-107. (In Russ.).
6. Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Frunze A. Kh. Anomaly crust fields from MAGSAT satellite measurements: their processing and interpretation. *Annals of Geophysics*. 2004;47(1):179-190.
7. Tsvetkov Yu. P., Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Hight-by-hight structure of magnetic anomalies based on gradient measurements in the stratosphere. *Geomagnetism i aeronomiya*. 2004;44(3):412-418. (In Russ.).
8. Pronin V. P., Kharitonov A. L. The use of different-altitude statistical characteristics of an anomalous magnetic field to assess the thickness of the magnetic active layer of the Earth's crust. *Fizika Zemli*. 1994;7-8:162-167. (In Russ.).
9. Fonarev G. A., Kharitonov A. L., Kharitonova G. P. Use of the spatial-temporary magnetic measurement methods for the analysis of the geomagnetic field, measured on the satellite «CHAMP». *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr"*. Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". *Earth Sciences*. 2007;2:49-53. (In Russ.).
10. Kharitonov A. L. Determination of magnetic body parameters, using spectral analysis of the anomalous magnetic field. *Berlin: HHI-Report*. 1987;21:99-106.
11. Kharitonov A. L. Geological and geophysical interpretation of analysis data of multilevel measurements of the geomagnetic field and their comparison with the features of deep seismic sounding sections. In: *Seismicheskie tekhnologii-2017: materialy nauch.-prakt. konf. = Seismic technologies-2017: materials of the scientific and practical conference*. Moscow: Izdatel'stvo Polipres; 2017, p. 250–252. (In Russ.).
12. Shchukin Yu. K. Geological challenges of regional geophysical research. *Geofizika*. 1997;1:12-19. (In Russ.).
13. Bott M. H. P. The interior of the Earth; 1971. 316 p. (Russ. ed.: *Vnutrennee stroenie Zemli*. Moscow: Mir; 1974. 373 p.).
14. Alekseev A. S., Lavrent'ev M. M., Nersesov I. L., Romanov V. G. Results of studying horizontal inhomogeneities of the mantle along the Pamir – Baikal profile. In: *Matematicheskie problemy geofiziki = Mathematical problems of geophysics*. Iss. 2. Moscow: Nauka; 1974, p. 143–157. (In Russ.).
15. Lyubimova E. A., Fel'dman I. S. Heat flow, temperature and electrical conductivity of the Earth's crust and upper mantle. *Kora i verkhnyaya mantiya Zemli = Crust and upper mantle of the Earth*. Moscow: Nauka; 1975, p. 117–132. (In Russ.).
16. Van'yan L. L. *Electromagnetic sounding*. Moscow: Nauchnyi mir; 1997. 218 p. (In Russ.).
17. Kupenko I., Aprilis G., Vasiukov D. M., McCammon C., Charlton S., Cerantola V. et al. Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths. *Nature*. 2019;570:102-106. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1254-8>.
18. Valyaev B. M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and oil and gas origin (acknowledgement and development of P. N. Kropotkin's idea). In: Dmitrievskii A. N., Valyaev B. M. (eds.). *Degazatsiya Zemli i genezis neftegazovykh mestorozhdenii (k 100-litiyu so dnya rozhdeniya akad. P. N. Kropotkina) = Degassing of the Earth and genesis of oil and gas fields (to the 100th birth anniversary of the Academician P.N. Kropotkin)*. Moscow: Geos; 2011, p. 10–32. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Харитонов Андрей Леонидович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории главного магнитного поля,
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН,
г. Москва, Россия,
ahariton@izmiran.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>.



Andrey L. Kharitonov,
Cand. Sci. (Phys. & Math.),
Leading Researcher of the Main Magnetic Field Laboratory,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia,
ahariton@izmiran.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>.

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 conflict 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 18.03.2022; одобрена после рецензирования 21.04.2022; принятая к публикации 24.05.2022.

The article was submitted 18.03.2022; approved after reviewing 21.04.2022; accepted for publication 24.05.2022.



Научная статья

УДК 550.837.6

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>



Особенности инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопоисковых исследованиях на территории Непско-Ботубинской антеклизы

Екатерина Викторовна Мурзина^a, Александр Валентинович Поспев^b,
Игорь Константинович Семинский^c, Игорь Владимирович Буддо^d,
Дарья Борисовна Немцева^e, Вячеслав Сергеевич Емельянов^f,
Юрий Александрович Агафонов^g

^{a-e}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

^{a,c-g}ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мурзина Екатерина Викторовна, mkv@sigma-geo.ru

Резюме. Данные нестационарных электромагнитных зондирований становлением поля в ближней зоне, широко применяемых для решения нефтегазопоисковых задач на Непско-Ботубинской антеклизе, чаще всего интерпретируются в рамках горизонтально-слоистых моделей сред. Целью данного исследования являлась разработка подхода к инверсии кривых электромагнитных зондирований, полученных с использованием высокоплотных 3D-сетей наблюдений. В основу исследования легло математическое моделирование, результаты которого позволили оценить латеральные пространственные параметры нестационарного электромагнитного поля и понять отличия результатов одномерной инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне относительно истинных параметров целевого горизонта. В результате была получена характеристика электромагнитного поля, которая описывается экспоненциальной функцией и применяется при латеральной закрепленной инверсии высокоплотных электромагнитных зондирований становлением поля в ближней зоне. Предлагаемый подход протестирован на практических данных в пределах участка исследований, расположенного на склоне Непско-Ботубинской антеклизы. Показано, что использование пространственной невязки при инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне позволяет получать геоэлектрические модели, характеризующиеся латеральной выдержанностью геоэлектрических параметров разреза. Применение подхода, основанного на методике пространственного накопления в процессе инверсии, позволяет повысить устойчивость решения обратной задачи данных зондирования становлением поля в ближней зоне.

Ключевые слова: Непско-Ботубинская антеклиза, зондирования становлением поля в ближней зоне, инверсия, квазигоризонтально-слоистая модель, пространственная невязка, удельное электрическое сопротивление

Благодарности: Авторы благодарят исполнительного директора ООО «СИГМА-ГЕО» М. В. Шарлова за всестороннюю поддержку в исследовательской деятельности и возможность использования данных зондирований становлением поля в ближней зоне.

Для цитирования: Мурзина Е. В., Поспев А. В., Семинский И. К., Буддо И. В., Немцева Д. Б., Емельянов В. С., Агафонов Ю. А. Особенности инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопоисковых исследованиях на территории Непско-Ботубинской антеклизы // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.

Original article

Features of high-density transient electromagnetic sounding data inversion under oil and gas prospecting in the Nepa-Botuoba anteclide area

Ekaterina V. Murzina^a, Alexandr V. Pospeev^b, Igor K. Seminskiy^c, Igor V. Buddo^d,
Daria B. Nemtseva^e, Vyacheslav S. Emelianov^f, Yuri A. Agafonov^g

^{a-e}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^dIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{a,c-g}LLC SIGMA-GEO, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Ekaterina V. Murzina, mkv@sigma-geo.ru

© Мурзина Е. В., Поспев А. В., Семинский И. К., Буддо И. В., Немцева Д. Б., Емельянов В. С., Агафонов Ю. А., 2022



Abstract. The data of near-field transient electromagnetic sounding, which are widely used for the purposes of oil and gas exploration within the Nepa-Botuoba antecline, are typically interpreted in terms of quasi-horizontally-layered models of media. The purpose of this study is to develop an approach to the inversion of transient electromagnetic sounding curves obtained via high-density 3D observation networks. The study was based on mathematical modeling, whose results allowed to estimate the lateral spatial parameters of a non-stationary electromagnetic field as well as to understand the differences between the results of one-dimensional inversion of the transient electromagnetic sounding data and the true parameters of the target horizon. As a result, the characteristic of the electromagnetic field described by an exponential function and used in the lateral-constraint inversion of high-density electromagnetic sounding was obtained. The proposed approach was tested on the practical data within the site under investigation located on the slope of the Nepa-Botuoba antecline. It is shown that the use of spatial discrepancy under TEM sounding data inversion makes it possible to obtain geoelectric models characterized by lateral consistency of section geoelectric parameters. The application of the spatial stacking-based approach in the inversion process allows to increase the solution stability of the inverse problem of the near-field TEM sounding data.

Keywords: Nepa-Botuoba antecline, near-field transient electromagnetic (TEM) sounding, inversion, quasi-horizontal layered model, spatial discrepancy, electrical resistivity

Acknowledgements: The authors thank M. V. Sharlov, the Executive Director of LLC SIGMA-GEO for the extensive support of the research and provided possibility to use the materials of near-field transient electromagnetic sounding.

For citation: Murzina E. V., Pospeev A. V., Seminskiy I. K., Buddo I. V., Nemtseva D. B., Emelianov V. S., Agafonov Y. A. Features of high-density transient electromagnetic sounding data inversion under oil and gas prospecting in the Nepa-Botuoba antecline area. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):137-151. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.

Введение

Сложное геологическое строение нефте-газоносных комплексов юга Сибирской платформы, отражающееся в слабой роли структурного фактора в локализации месторождений углеводородов, побуждает исследователей рассматривать задачу непосредственного картирования зон коллекторов в качестве первоочередной. Это предопределяет необходимость развития современных динамических методов анализа сейсмических материалов [1], а также использования несейсмических методов, прежде всего нестационарных электромагнитных зондирований. Геологическая эффективность применения электромагнитных зондирований обусловлена соответствующими петрофизическими характеристиками горизонтов-коллекторов, являющихся контрастными объектами для картирования их электроразведкой. Все вышеперечисленные факторы подтолкнули к разработке методик совмещенных высокоплотных 3D-сетей наблюдений сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ-3D) и зондирований становлением поля в ближней зоне, выполненных по плотной сети наблюдений (ЗСБ-3D).

На сегодняшний день метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) является одним из наиболее часто применяемых методов электроразведки при решении

нефтегазопоисковых задач на юге Сибирской платформы. Принцип зондирования прост: в генераторную петлю (источник электромагнитного поля) подается токовой импульс, порождающий магнитное поле, вследствие затухания которого в зондируемом пространстве индуцируются вихревые токи, распространяющиеся от дневной поверхности в глубину со скоростью, пропорциональной удельной электропроводности вмещающей среды. Затухание вихревых токов, в свою очередь, инициирует вторичное магнитное поле, затухание которого регистрируется на зажимах приемных контуров в виде спада электродвижущей силы. Для удобства интерпретации рассчитываются трансформации кривой электродвижущей силы – кривые кажущегося сопротивления $\rho_t(t)$ и кажущейся проводимости $S_t(H_t)$ [2, 3].

Совокупность таких факторов, как переход к решению задач в сложных геолого-геофизических условиях, а также значительное удорожание поисково-разведочного бурения, в настоящее время является причиной очень острой постановки вопроса повышения эффективности геофизического сопровождения геологоразведочного процесса, из чего закономерно вытекает необходимость в усовершенствовании программного комплекса. Физическое увеличение объема получаемой электромагнитной информации требует соот-



вествующего совершенствования аппарата инверсии. Использование «ручного» подбора моделей влечет существенные затраты времени; кроме того, в силу субъективизма интерпретаторов трудно обеспечить необходимое качество получаемых геоэлектрических моделей. Необходимость ускорения и унификации процесса инверсии данных ЗСБ-3D, а также минимизации субъективных факторов побуждает к разработке и внедрению методики автоматической инверсии данных и ее адаптации под поставленные задачи.

Неединственность решения обратной задачи геофизики [4, 5] применительно к инверсии данных ЗСБ-3D требует использования способов регуляризации решения [6, 7], а также оптимизации подходов к инверсии в зависимости от размерности геоэлектрического пространства [7, 8]. В геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы при незначительном контрасте параметров разреза основной методикой инверсии данных ЗСБ является интерпретация в рамках квазигоризонтально-слоистой модели [9–11]. При этом инверсия каждой кривой ЗСБ производится отдельно, а в качестве стартового приближения используется модель, полученная для соседнего зондирования. В случае производства работ по высокоплотной сети наблюдений подобный подход приводит к появлению ложной дифференцированности геоэлектрических параметров средней и нижней частей разреза, не соответствующей разрешающей способности электромагнитных методов.

Существуют различные способы регуляризации обратной задачи. Например, с целью обеспечения латеральной выдержанности квазигоризонтально-слоистой среды задаются ограничения для модельных данных при помощи ковариационной матрицы шероховатости, которая применяется к вектору параметров модели [12, 13]. Данный подход называется латеральной закрепленной инверсией (англ.: lateral constrained inversion, LCI) [12–14]. При применении подхода по данным априорной информации закрепляется глубина и в рамках закрепленной модели происходит вариация геоэлектрических параметров. В данной статье авторы освещают результат применения пространственного

накопления в процессе инверсии данных ЗСБ в пределах радиуса влияния от целевого объекта исследований на примере разреза юго-восточного склона Непского свода.

Материалы и методы исследования

Физико-геологическая модель объекта исследования. Согласно карте тектонического районирования, исследуемый участок располагается в пределах Непского свода, являющегося крупнейшим структурным элементом Непско-Ботуобинской антеклизы (рис. 1) [15]. Непско-Ботуобинская антеклиза является надпорядковой структурой Сибирской платформы, расположена в юго-восточной части данной платформы и имеет размеры 850×350 км, амплитуду порядка 1000 м и площадь около 235 тыс. км².

В платформенном чехле рассматриваемой территории по структурно-тектоническим и литологическим признакам выделяется три комплекса: подсолевой (рифей-венд-нижнекембрийский), соленосный (нижнекембрийский) и надсолевой (представленный отложениями нижне-средне-верхнекембрийского, ордовикского, юрского возрастов). Толщина осадочного чехла на территории исследования варьирует от 1667 до 1816 м.

Подсолевой комплекс включает в себя терригенно-карбонатные отложения непской, тирской, катангской, собинской, тэтэрской свит и осинского горизонта усольской свиты. С подсолевым комплексом осадочного чехла связаны основные перспективы нефтегазоносности. В пределах комплекса расположены карбонатные (осинский, усть-кутский, преображенский) и терригенные (верхнечонский) нефтегазоносные горизонты. Эти горизонты занимают различное гипсометрическое положение, но обладают сходным структурным планом.

Отложения подсолевого комплекса стратиграфически связаны с карбонатными и терригennыми отложениями венда и нижнего кембра. С учетом разрешающей способности практических кривых ЗСБ и данных глубокого бурения скважин (геофизического исследования скважин) подсолевой комплекс может быть подразделен на три подгоризонта

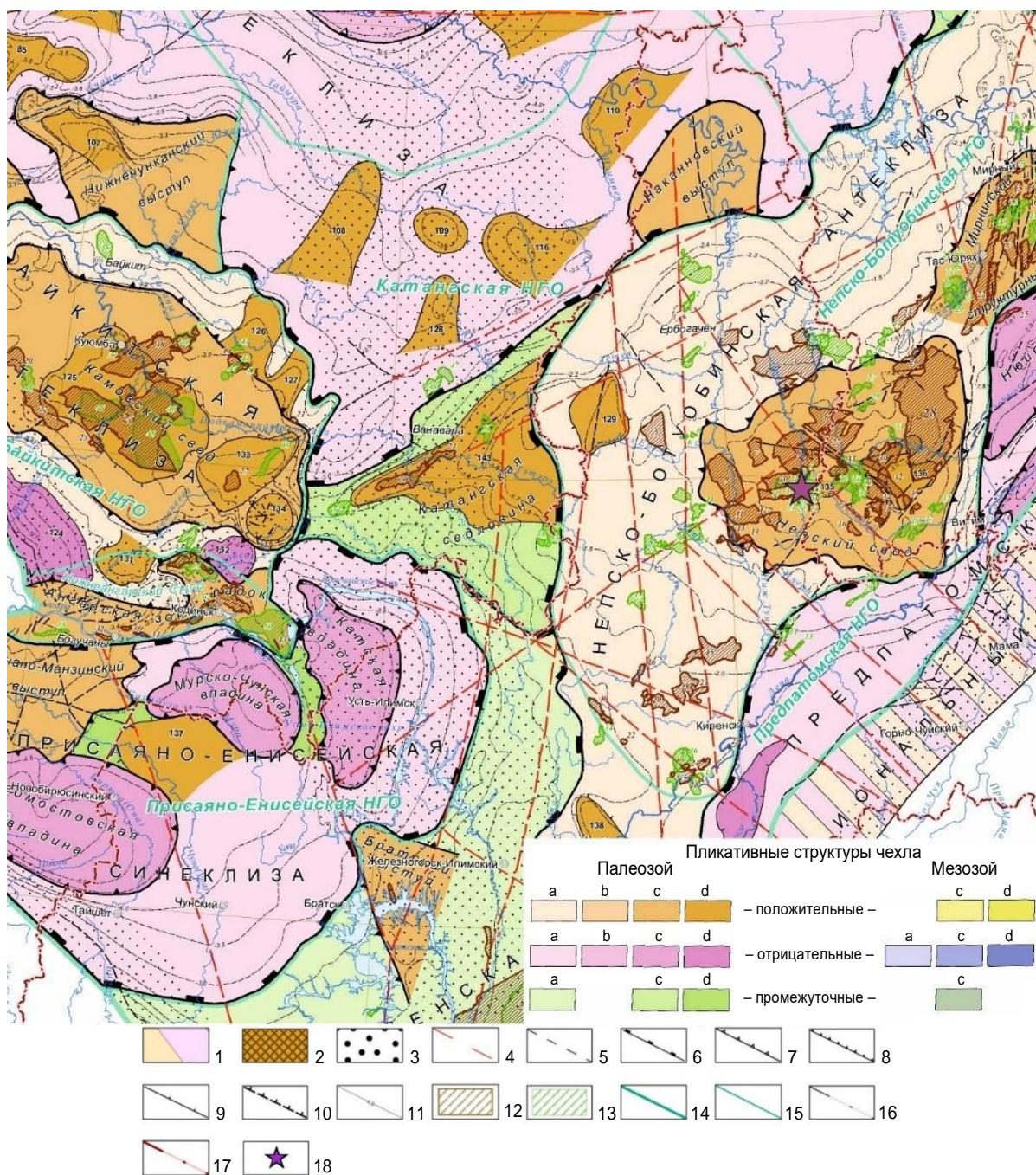


Рис. 1. Схематическая карта основных тектонических структур юга Сибирской платформы (по В. С. Старосельцеву, 2018):

1 – зона складчато-надвиговых дислокаций; 2 – выходы кристаллического фундамента; 3 – зоны интенсивного рифейского прогибания; 4 – региональные глубинные разломы; 5 – разрывы, установленные геологической съемкой, сейсморазведкой и подтверждены бурением; 6–10 – контуры: 6 – надпорядковых структур, 7 – суперпорядковых структур, 8 – структур первого порядка, 9 – структур второго порядка, 10 – предполагаемые выделения; 11 – стратоизогипсы венда – кембрия; 12 – месторождения углеводородов; 13 – подготовленные месторождения; 14, 15 – нефтегеологическое районирование; 16, 17 – государственные границы субъектов Российской Федерации; 18 – местоположение участка исследования

Fig. 1. Schematic map of the main tectonic structures in the south of the Siberian platform (according to V. S. Staroseltsev, 2018):

1 – zone of fold-thrust dislocations; 2 – outcrops of the crystalline basement; 3 – zones of intensive Riphean subsidence; 4 – regional deep faults; 5 – discontinuities established by a geological survey, seismic survey, and confirmed by drilling; 6–10 – the contours of: 6 – supra-order structures, 7 – superorder structures, 8 – first order structures, 9 – second order structures, 10 – anticipated allocations; 11 – Vendian – Cambrian structure contours; 12 – hydrocarbon deposits; 13 – developed fields; 14, 15 – oil field geological zoning; 16, 17 – state borders of the regions of the Russian Federation; 18 – location of the site under investigation



с разными геоэлектрическими характеристиками. Верхний подгоризонт включает карбонатные отложения осинского и усть-кутского горизонтов и отличается пониженным продольным сопротивлением (десятки Ом·м) лишь при улучшении их коллекторских свойств. Средний подгоризонт сложен карбонатными породами собинской, тэтэрской свиты и обладает продольным сопротивлением в первые сотни Ом·м. Нижний же подгоризонт, являющийся целевым объектом исследований, объединяет преображенский пласт, терригенные породы чорской свиты и кору выветривания и характеризуется диапазоном продольного сопротивления 16–200 Ом·м.

Соленосный комплекс включает отложения литвинцевской, ангарской, буйской, бельской и усольской свит среднего и нижнего кембрия. Суммарная толщина комплекса составляет 1100–1200 м, при этом для него характерно переслаивание пластов солей и карбонатов. Поскольку удельное электрическое сопротивление (УЭС) солей крайне велико, его величина применительно к отложениям карбонатно-галогенного комплекса в основном определяется поведением карбонатной части разреза, в частности наличием в его пределах ряда региональных флюидонасыщенных зон коллекторов. Таким образом, максимальное УЭС горизонтов карбонатно-галогенного комплекса достигает 300–500 Ом·м, а минимальное снижается до первых десятков Ом·м.

В геоэлектрическом плане наиболее контрастным является надсолевой комплекс осадочного чехла, объединяющий отложения среднего – верхнего кембрия (верхоленская, илгинская свиты), а также юрские и четвертичные отложения. Пониженные УЭС (до 20–80 Ом·м) связаны с наличием водонасыщенных горизонтов-коллекторов в отложениях юры и верхнего кембрия (таблица).

Породы кристаллического фундамента являются основным опорным горизонтом, который обладает высоким УЭС, как правило, превышающим 1000 Ом·м.

Таким образом, разрез осадочного чехла сложен породами, различающимися по продольному сопротивлению, что является благоприятным фактором для изучения методом ЗСБ. Корреляция геоэлектрических и коллекторских свойств горных пород дает возможность изучать зоны распространения коллекторов во всех интервалах разреза.

Методика расчета весовой функции для инверсии данных высокоплотных зондирований. При решении обратной задачи средствами одномерной интерпретации для точной оценки геоэлектрических параметров важно учитывать, какой объем зондируемого пространства в целом занимают вихревые токи при проникновении в исследуемую среду (квазигоризонтально-слоистый разрез) [16]. Если разрез сложен горизонтально залегающими слоями, в поздней стадии вихревые токи в нижнем полупространстве распростра-

Физико-геологическая модель территории исследований Physico-geological model of the area under investigation

Номер слоя	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Мощность, м	Геологическое описание
1	170	140	Юрские отложения, Ј
2	200	250	Илгинская, верхоленская свиты, Є ₃
3	150	300	Литвинцевская свита, Є ₁₋₂
4	300	200	Ангарская свита, Є ₁
5	50	250	Бельско-бульский комплекс, Є ₁
6	300	400	Усольская свита, Є ₁
7	150	100	Осинский и усть-кутский горизонты, Є ₁
8	80	120	Собинская, тэтэрская свиты, Є ₁
9	45	100	Катангская, чорская свиты и кора выветривания, V-Є ₁
10	2000	Н. о.	Архейский фундамент

Примечание. Н. о. – мощность не определена.

Note. N. o. – thickness is not determined.



няются равномерно. Однако, когда вихревые токи достигают неоднородности или несогласно залегающих слоев, их равномерное распределение нарушается, вследствие чего сигнал электродвижущей силы, регистрируемый на зажимах приемной петли, осложняется влиянием объекта [16].

Исследования выполнялись с помощью цифровой телеметрической электроразведочной станции SGS-TEM [17] по регулярной плотной сети шестиразносными установками (две соосные петли (Qq) и четыре разнесенные ($Q-q$)). Источником нестационарного поля являлась генераторная петля размером 600×600 м, в которую подавался ток до 250 А; приемные петли размером 18×18 м располагались на удалении 140, 500, 900 м от центра источника.

Применительно к конкретным геоэлектрическим условиям объем распространения вторичного электромагнитного поля возможно оценить с помощью трехмерного математического моделирования. Для этого были проведены соответствующие математические расчеты с использованием программы GEO-EM [18].

Расчеты синтетических кривых ЗСБ проводились для установок зондирования, наиболее часто применяемых в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (рис. 2, а). Инверсия модельных данных производилась с помощью модуля автоматической одномерной инверсии Model4 [19], разработанного на базе Model3 [20], встроенного в программный комплекс SGS-TEM [17].

В качестве референтной использовалась геоэлектрическая модель, по проводимости надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов близкая к типичной геоэлектрической модели для Непско-Ботуобинской антеклизы (см. таблицу).

Далее при помощи программы GEO-EM [18] были рассчитаны переходные характеристики от среды без объекта с УЭС подсолевого комплекса слоя 9 $\rho_1 = 23$ Ом·м (см. рис. 2, таблицу), в которую помещен относительно контрастный по геоэлектрическим свойствам проводящий объект (коллектор $\rho_2 = 10$ Ом·м). Затем проводилось восстановление УЭС данного горизонта по модельным кривым в рамках закрепленного структурного каркаса.

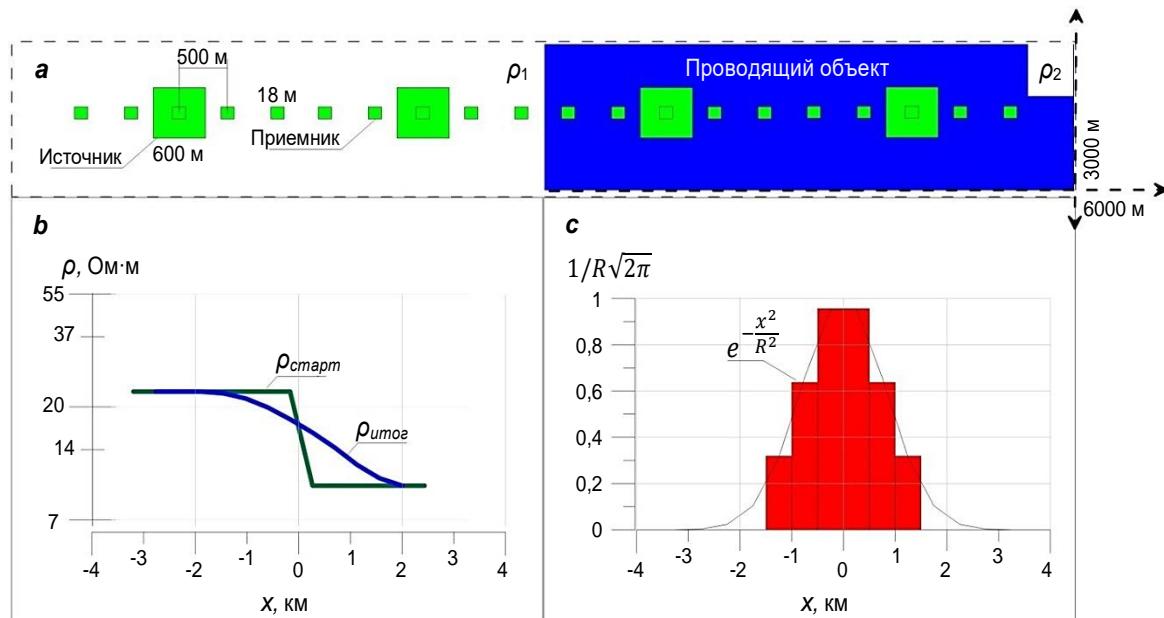


Рис. 2. Схема и результаты моделирования по профилю:

- a – схема профиля и положения токопроводящего объекта на глубине 1800 м;
 b – график исходного и восстановленного значений удельного электрического сопротивления;
 c – результат дифференцирования восстановленных значений удельного электрического сопротивления и расчета пространственного фильтра

Fig. 2. Diagram and modeling results by the profile:

- a – profile diagram and locations of a conducting object at the depth of 1800 m;
 b – graph of the initial and restored values of electrical resistivity;
 c – result of restored resistivity value differentiating and spatial filter calculation



По мере удаления от границы смены параметров подсолевого комплекса результаты инверсии приближаются к модельным и УЭС слоя определяется все более точно.

В результате 1D-инверсии синтетических кривых определено, что геоэлектрические параметры целевого горизонта восстанавливаются с минимальной ошибкой. График УЭС, определенных в результате инверсии, представляет собой результат сглаживания исходного графика УЭС модели и может быть представлен в виде свертки (1):

$$\log(\rho_{result}) = \log(\rho_{start}) * K_f, \quad (1)$$

где ρ_{result} , ρ_{start} – сглаженное и исходное УЭС; K_f – коэффициент фильтра.

Коэффициенты весового фильтра получены дифференцированием графика результата инверсии. Ширина полученного в результате расчета фильтра пропорциональна радиусу влияния неоднородности и примерно равна удвоенной глубине расположения целевого горизонта. Середина фильтра соответствует границе смены сред, а его коэффициенты довольно точно аппроксимируются гауссовой функцией (рис. 2, с).

При площадной инверсии данных размерность уравнения (1) увеличивается и фильтр становится двумерным и осесимметричным. На основании этого предложена методика, отличающаяся от обычной «поточечной» одномерной инверсии. При подборе модифицируется общее значение УЭС слоя для всех кривых ЗСБ, входящих в радиус исследований. Функционал невязки рассчитывается при этом с использованием весовой функции $W(R)$ (2):

$$W(R) = K_f = e^{-\frac{x^2}{R^2}}, \quad (2)$$

где x – расстояние между пунктами наблюдений; R – радиус влияния неоднородности, м.

Общая формула функционала (3):

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}}, \quad (3)$$

где δ_i – невязка между теоретической и практической кривыми i -й точки; n – количество точек в радиусе влияния неоднородности.

Поскольку ширина «зоны захвата» электромагнитного поля меняется в зависимости от глубины интерпретируемого слоя, значения сглаживающего фильтра рассчитываются

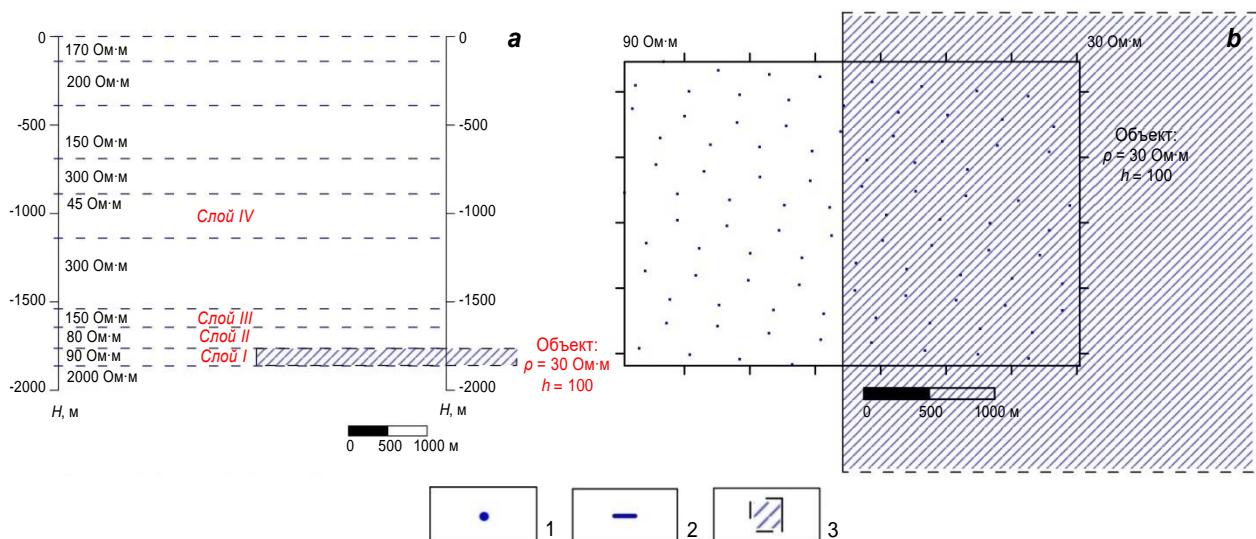
для каждого из них. Понятно, что эффективность пространственного сглаживания зависит от количества точек, входящих в радиус влияния. При использовании высокоплотных сетей наблюдений оно возрастает в квадрате по отношению к количеству точек на одной линии, что обеспечивает эффективность методики именно при инверсии данных ЗСБ-3Д.

Для оценки эффективности методики использования пространственной невязки в ходе инверсии для типичных геологических условий юга Сибирской платформы проведено синтетическое моделирование. На модельной площади было размещено около ста точек зондирований по плотной 3D-сети наблюдений. Далее проводился расчет кривых ЗСБ в программном обеспечении GEO-EM [17] и инверсия в Model4 [19]. На каждую теоретическую кривую, рассчитанную для референтной модели, с включением неоднородности накладывался электромагнитный шум, характерный для исследуемой территории.

На рис. 3 показана модель исследований и сеть наблюдений, на рис. 4, 5 – результат поточечной инверсии и инверсии с использованием пространственной невязки.

В инверсии при восстановлении геоэлектрической модели участвовало четыре слоя, отличавшихся наибольшей эквивалентностью. Остальные слои модели не участвовали в инверсии и закреплялись. Проводящий слой IV восстанавливается достаточно устойчиво, в то время как горизонты, относящиеся к подсолевым отложениям (см. рис. 3, слои I–III), отличались высокой дисперсией получаемых моделей УЭС.

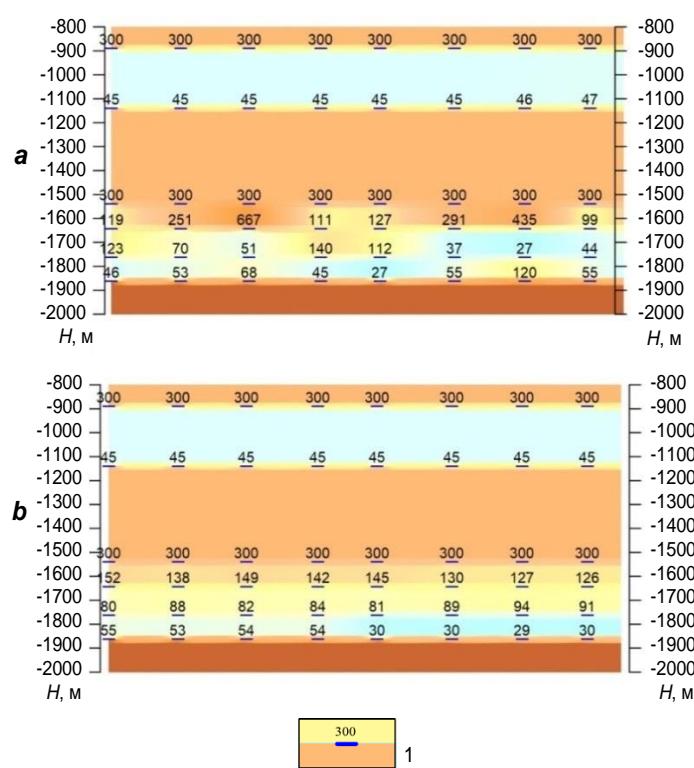
Таким образом, результаты синтетического моделирования показывают, что поточечная инверсия неизбежно приводит к формированию «пестрой» финальной модели за счет «переноса» погрешностей с кривых в разрез и высокой детализации разреза (см. рис. 5, a_I, a_{II}, a_{III}). Использование же пространственной невязки «распределяет» погрешности по всей совокупности кривых в радиусе исследований, что и формирует модель, гладкость которой соответствует эффективному разрешению электромагнитного поля на данной глубине, позволяя устойчиво и более точно восстановить модель (см. рис. 5, b_I, b_{II}, b_{III}).

**Рис. 3. Схема математического моделирования:****a – в разрезе; b – в плоскости**

- 1 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне;
 2 – границы геоэлектрических слоев; 3 – трехмерный объект

Fig. 3. Diagram of mathematical modeling:**a – in section; b – in plane**

- 1 – points of the near-field transient electromagnetic sounding;
 2 – boundaries of geoelectric layers; 3 – a three-dimensional object

**Рис. 4. Фрагменты геоэлектрических разрезов, полученные по результатам математического моделирования с применением:**

- a – поточечной инверсии; b – пространственной невязки**

1 – границы геоэлектрических слоев**Fig. 4. Fragments of the geoelectric sections obtained from the results of mathematical modeling using:****a – point-wise inversion; b – spatial discrepancy****1 – boundaries of geoelectric layers**

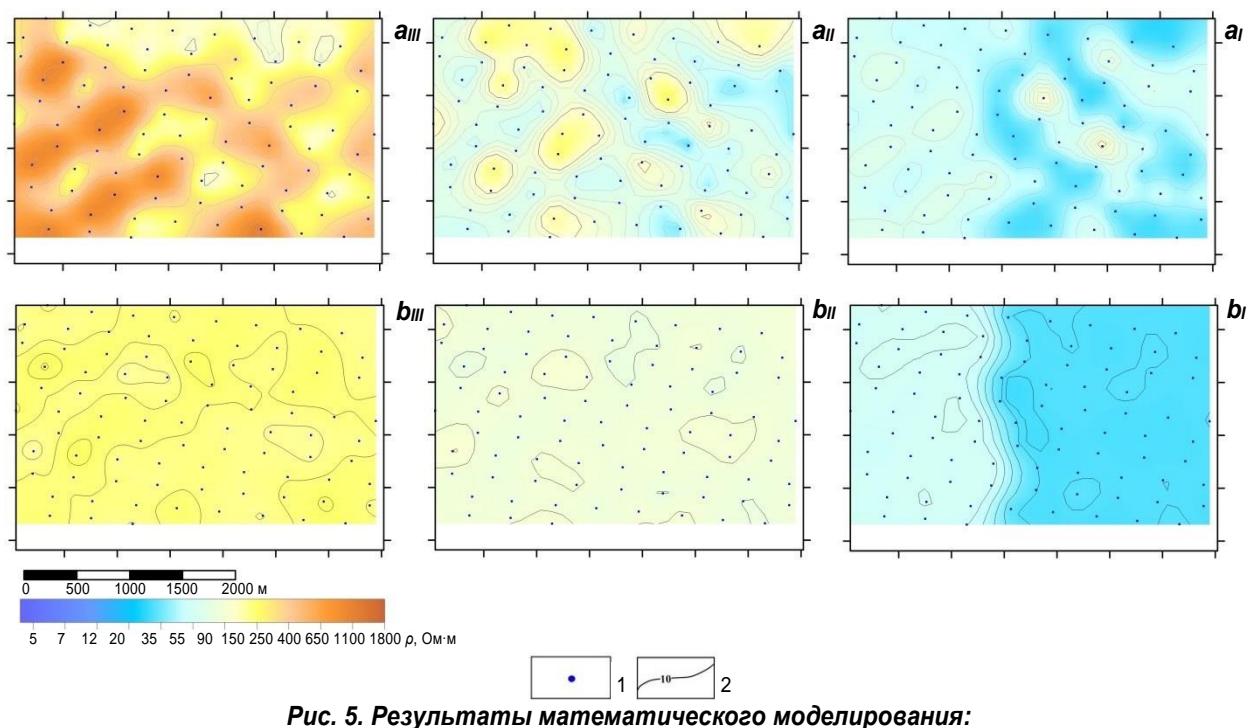


Рис. 5. Результаты математического моделирования:

a – карта удельного электрического сопротивления, полученная с применением поточечной инверсии;
b – карта удельного электрического сопротивления, полученная с применением пространственной невязки
III – карта удельного электрического сопротивления отложений осинского и усть-кутского горизонтов, ϵ ;
II – карта удельного электрического сопротивления отложений сабинской, тэтэрской свит, ϵ_1 ;
I – карта удельного электрического сопротивления катангской, чорской свиты и коры выветривания, $V-\epsilon_1$

1 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне;

2 – изолинии удельного электрического сопротивления

Fig. 5. Mathematical modeling results:

a – electrical resistivity map obtained by point-wise inversion; b – electrical resistivity map obtained using spatial discrepancy
III – electrical resistivity map of the sediments of the Osinsky and Ust-Kutsky horizons, ϵ ;
II – electrical resistivity map of the sediments of the Sobino and Teter formations, ϵ_1 ;
I – electrical resistivity map of the sediments of the Katanga, Chora formations and weathering crust, $V-\epsilon_1$,
1 – points of near-field transient electromagnetic sounding; 2 – electrical resistivity contours

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера приведен результат интерпретации данных ЗСБ (рис. 6), выполненных на одной из площадей Непско-Ботубинской антеклизы, в пределах Непского свода. Работы методом ЗСБ выполнялись по высокоплотной сети наблюдений (10 ф. н. на 1 км²). Инверсия проводилась в рамках закрепленного структурного каркаса по данным сейсморазведки МОГТ-3Д. Детализация структурного каркаса выполнялась в соответствии с данными бурения скважин и МОГТ-3Д.

В первом и во втором случае отмечено, что полученные по результату решения обратной задачи невязки близки (см. рис. 6, *b_I*, *b_{II}*) и в большей степени связаны с качеством полевого материала в некоторых участках присутствия осложненных кривых ЗСБ (где

невязка более 2 %). Чрезмерная детализация разреза приводит к повышению эквивалентности между смежными слоями, ввиду чего в рамках схожих значений невязок могут быть построены абсолютно разные модели УЭС (см. рис. 6, *a_I*, *a_{II}*). На карте УЭС, полученной в результате применения поточечной инверсии (см. рис. 6, *a_I*), отмечена высокая дисперсия УЭС, которая отражает в большей степени качество полевого материала (присутствие локальных «выскоков» в местах осложнения кривых ЗСБ). Вследствие применения разработанной методики осложняющие интерпретацию эффекты полностью устраняются (см. рис. 6, *a_{II}*). Проследивается зональность геоэлектрических аномалий по площади. Единый подход к инверсии данных значительно снижает вероятность возникновения единичных локальных «выскоков», которые наблюдаются

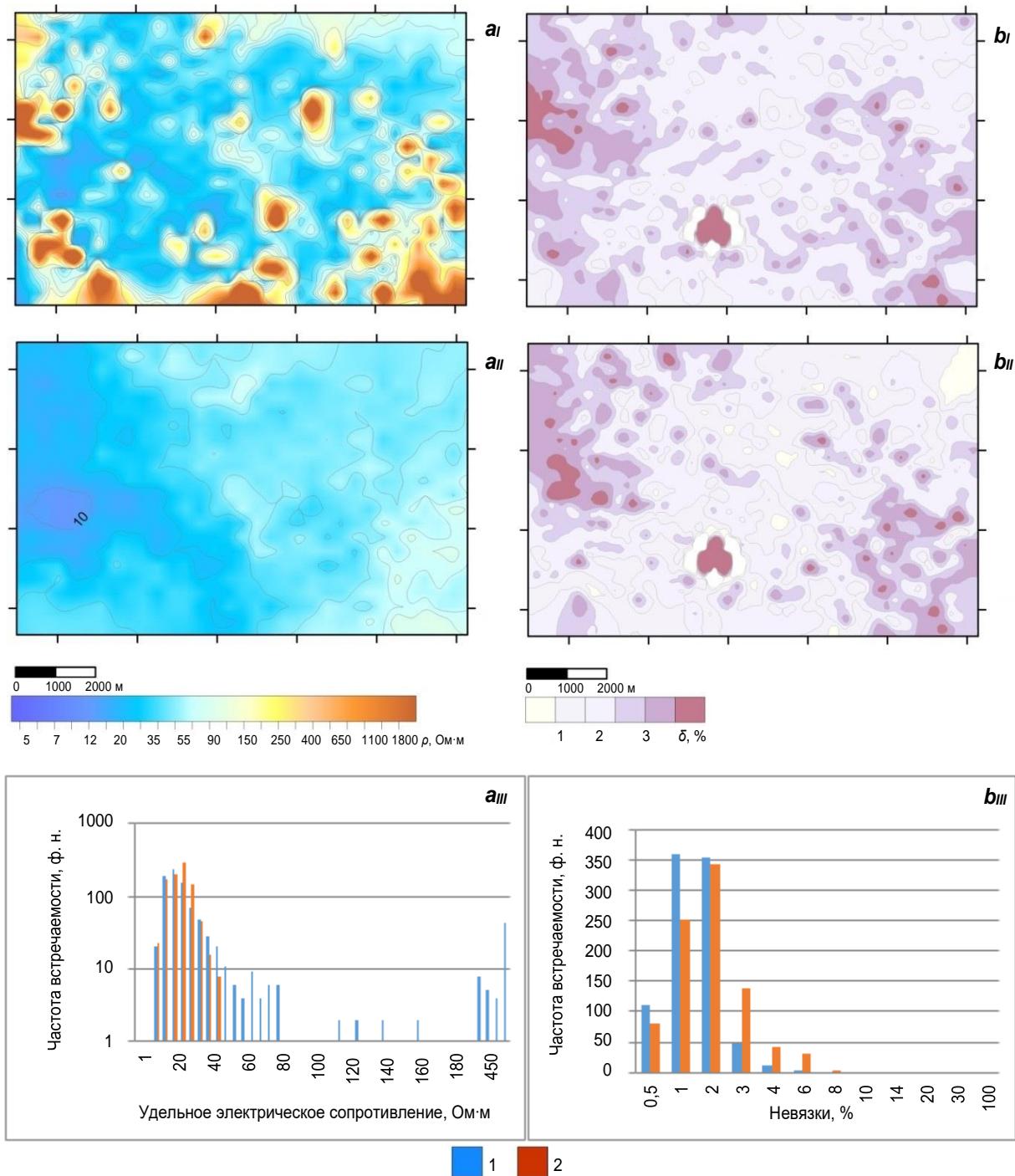


Рис. 6. Результат поточечной инверсии и инверсии с применением пространственной невязки:
 а_I, а_{II} – карты удельного электрического сопротивления и невязок поточечной инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне; а_{III} – сравнение распределений удельного электрического сопротивления при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой; б_I, б_{II} – карты удельного электрического сопротивления и невязок инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне с применением пространственной невязки; б_{III} – сравнение распределений невязок при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой
 1 – поточечная инверсия; 2 – инверсия с применением пространственной невязки

Fig. 6. The result of the point-wise inversion and inversion using spatial discrepancy:
 а_I, а_{II} – maps of electrical resistivity and point-wise inversion misfit of the near-field transient electromagnetic sounding curves; а_{III} – comparison of electrical resistivity distributions under point-wise inversion and inversion with spatial discrepancy; б_I, б_{II} – maps of electrical resistivity and inversion misfit of the near-field transient electromagnetic sounding curves using spatial discrepancy; б_{III} – comparison of misfit distributions under point-wise inversion and inversion with spatial discrepancy
 1 – point-wise inversion; 2 – inversion using spatial discrepancy



при применении поточечной инверсии, позволяя уменьшить влияние дисперсии на «хвостах» кривых ЗСБ.

Наиболее наглядно оценить и сравнить полученные результаты позволяет построение диаграмм распределений УЭС и невязок (см. рис. 6, a_{III}, b_{III}).

Распределение УЭС, полученное в результате выполнения инверсии с применением пространственного фильтра (см. рис. 6, a_{III}, b_{III}), становится более устойчивым и стремится к log-нормальному распределению. В первом случае решение обратной задачи менее устойчиво.

При этом в первом случае в результате решения обратной задачи получены невязки ниже, чем во втором. Это объясняется тем, что не всегда невязка является показателем качества решения обратной задачи и в некоторых случаях чрезмерный подбор кривых ЗСБ приводит к учету случайных полевых погрешностей кривых, не несущих в себе информации.

Проведение интерпретации с применением разработанной методики совместной инверсии соседних зондирований позволяет по-

лучить уверенный результат, который в дальнейшем может использоваться для составления прогнозных карт.

Заключение

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– результаты проведенных исследований позволили оценить латеральные пространственные параметры нестационарного электромагнитного поля и понять отличия результатов одномерной инверсии данных ЗСБ относительно истинных параметров целевого горизонта;

– в результате моделирования получена формула пространственной невязки, которая описывается экспоненциальной функцией и применяется при инверсии высокоплотных электромагнитных зондирований для регуляризации обратной задачи при инверсии кривых ЗСБ;

– применение подхода, основанного на методике пространственного накопления в процессе инверсии, позволяет повысить надежность решения обратной задачи ЗСБ за счет устойчивости ее решения.

Список источников

1. Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии: монография. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2006. 479 с.
2. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
3. McNeill J. D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN7. Mississauga: Geonics Limited, 1980. 17 р.
4. Жданов М. С. Геофизическая электромагнитная теория и методы: монография. М.: Научный мир, 2012. 680 с.
5. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 254 с.
6. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягода А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 230 с.
7. Oldenburg D. W., Li Y., Aki K., Richards P. G., Alumbaugh D., Newman G. [et al.]. Inversion for applied geophysics: a tutorial // Near-surface geophysics / ed. D. K. Butler. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2005. Р. 89–150.
8. Тригубович Г. М., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г. 3D-электроразведка становлением поля: монография. Новосибирск: Наука, 2009. 217 с.
9. Панкратов В. М., Турицын К. С. Геоэлектрические модели горизонтально-слоистого разреза Непского свода // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1987. С. 131–135.
10. Поспев А. В., Буддо И. В., Агафонов Ю. А., Шарлов М. В., Компаниец С. В., Токарева О. В. [и др.]. Современная практическая электроразведка: монография. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.
11. Семинский И. К., Поспев А. В., Гусейнов Р. Г. Оптимизация метода ЗСБ средствами математического моделирования: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 129 с.
12. Auken E., Christiansen A. V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data // Geophysics. 2004. Vol. 69. Iss. 3. P. 752–761. <https://doi.org/10.1190/1.1759461>.
13. Santos F. A. M. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data // Journal of Applied Geophysics. 2004. Vol. 56. Iss. 2. P. 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>.
14. Wisén R., Auken E., Dahlin T. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes // Near



Surface Geophysics. 2005. Vol. 3. Iss. 2. P. 71–79.
<https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>.

15. Конторович А. Э., Мельников Н. В., Старосельцев В. С. Нефтегазоносные провинции и области Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы: сб. статей. Новосибирск: Изд-во СНИИГиМС, 1975. С. 4–21.

16. Табаровский Л. А., Эпов М. И., Антонов Е. Ю. Электромагнитное поле в средах со слабонегоризонтальными границами. Новосибирск: Изд-во ИГГ СО АН СССР, 1988. 20 с.

17. Шарлов М. В., Агафонов Ю. А., Стефаненко С. М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 1. С. 20–24.

18. Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли 2011. № 2. С. 3–14.

19. Емельянов В. С., Суров Л. В., Шарлов М. В., Агафонов Ю. А. Современное программное средство 1D инверсии и моделирования данных ЗСБ Model4 // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: XIII Междунар. науч.-практ. семинар. СПб., 2016. С. 115–118.

20. Агафонов Ю. А., Поспев А. В., Суров Л. В. Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1. С. 33–36.

References

1. Kozlov E. A. *Models of environment in exploratory seismology*. Tver: Izd-vo GERS; 2006. 479 p. (In Russ.).
2. Van'yan L. L. *Fundamentals of electromagnetic sounding*. Moscow: Nedra; 1965. 109 p. (In Russ.).
3. McNeill J. D. *Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN7*. Missasagua: Geonics Limited; 1980. 17 p.
4. Zhdanov M. S. *Geophysical electromagnetic theory and methods*. Moscow: Nauchnyi mir; 2012. 680 p. (In Russ.).
5. Svetov B. S. *Theory, methods and interpretation of low-frequency inductive electrical exploration materials*. Moscow: Nedra, 1973; 254 p. (In Russ.).
6. Tikhonov A. N., Goncharskii A. V., Stepanov V. V., Yagola A. G. *Numerical methods for solving ill-defined problems*. Moscow: Nauka; 1990. 230 p. (In Russ.).
7. Oldenburg D. W., Li Y., Aki K., Richards P. G., Alumbaugh D., Newman G., et al. Inversion for applied geophysics: a tutorial. In: Butler D. K. (ed.). *Near-surface geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 2005, p. 89–150.
8. Trigubovich G. M., Persova M. G., Soloveichik Yu. G. *3D TEM sounding*. Novosibirsk: Nauka; 2009. 217 p. (In Russ.).
9. Pankratov V. M., Turitsyn K. S. Geoelectrical models of the Nepta arch horizontally layered section. In: *Obespechenie nauchno-tehnicheskogo progressa pri geofizicheskikh issledovaniyakh v Vostochnoi Sibiri = Providing scientific and technological progress in geophysical research in Eastern Siberia*. Irkutsk – Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials; 1987, p. 131–135. (In Russ.).
10. Pospeev A. V., Buddo I. V., Agafonov Yu. A., Sharlov M. V., Kompaniets S. V., Tokareva O. V., et al. *Modern practical electrical exploration*. Novosibirsk: Geo; 2018. 231 p. (In Russ.).
11. Seminskiy I. K., Pospeev A. V., Guseinov R. G. *Optimization of TEM sounding by mathematical modeling*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2019. 129 p. (In Russ.).
12. Auken E., Christiansen A. V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics*. 2004;69(3):752–761. <https://doi.org/10.1190/1.1759461>.
13. Santos F. A. M. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*. 2004;56(2):123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>.
14. Wisén R., Auken E., Dahlin T. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surface Geophysics*. 2005;3(2):71–79. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>.
15. Kontorovich A. E., Mel'nikov N. V., Starosel'tsev V. S. Oil and gas provinces and areas of the Siberian platform. In: *Geologiya i neftegazonosnost' Sibirskoi platformy = Geology and oil and gas potential of the Siberian platform*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials; 1975, p. 4–21. (In Russ.).
16. Tabarovskiy L. A., Epov M. I., Antonov E. Yu. *Electromagnetic field in media with slightly non-horizontal boundaries*. Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1988. 20 p. (In Russ.).
17. Sharlov M. V., Agafonov Yu. A., Stefanenko S. M. SGS-TEM and FastSnap modern telemetric electrical exploration stations. Efficiency and application experience. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2010;1:20–24. (In Russ.).
18. Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Trigubovich G. M. Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method. *Fizika Zemli*. 2011;2:3–14. (In Russ.).
19. Emelianov V. S., Surov L. V., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. Model 4 as a modern software tool for TEM data 1D inversion and modeling. In: *Primenenie sovremennykh elektrorazvedochnykh tekhnologii pri poiskakh mestorozhdenii poleznykh iskopаемых: XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. seminar = Application of modern electrical exploration technologies in the search for mineral deposits: 13th International scientific and practical seminar*. Saint Petersburg; 2016, p. 115–118. (In Russ.).
20. Agafonov Yu. A., Pospeev A. V., Surov L. V. Data



interpretation system and main application directions of non-stationary electromagnetic sounding-based researched in the South of the Siberian platform. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2006;1:33-36. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Мурзина Екатерина Викторовна,
инженер Лаборатории нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ведущий геофизик,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
mkv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1125-8838>.

Ekaterina V. Murzina,
Engineer of Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Leading Geophysicist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
mkv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1125-8838>.



Поспев Александр Валентинович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
avp@crust.irk.ru.

Alexandr V. Pospeev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Leading Researcher,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
avp@crust.irk.ru.



Семинский Игорь Константинович,
кандидат геолого-минералогических наук,
начальник Центра комплексного мониторинга опасных геологических процессов,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ведущий специалист по технологиям электроразведки,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
iks@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7530-0716>.

Igor K. Seminskiy,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Centre for Geological Hazard Integrated Monitoring,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Leading Specialist in Electrical Exploration Technologies,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
iks@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7530-0716>.



Буддо Игорь Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
главный геофизик,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
biv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>.

Igor V. Buddo,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Integrated Geophysics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Chief Geophysicist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
biv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>.



Немцева Дарья Борисовна,
аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
геофизик,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
ndb@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0585-0349>.

Daria B. Nemtseva,
Postgraduate,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Geophysicist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
ndb@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0585-0349>.



Емельянов Вячеслав Сергеевич,
ведущий специалист по разработке программного обеспечения,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
evs@sigma-geo.ru.

Vyacheslav S. Emelianov,
Leading Software Development Specialist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
evs@sigma-geo.ru.



Агафонов Юрий Александрович,
директор,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
agafonov@sigma-geo.ru.

Yuri A. Agafonov
Director,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
agafonov@sigma-geo.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

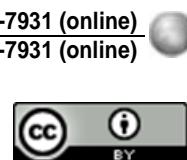
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

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 03.03.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принятая к публикации 11.05.2022.

The article was submitted 03.03.2022; approved after reviewing 06.04.2022; accepted for publication 11.05.2022.



Научная статья

УДК 552.143

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-152-161>

Литолого-фациальная изменчивость ярактинского горизонта как комплексный результат геодинамических процессов тектоногенеза и седиментогенеза

Лариса Александровна Рапацкая^a, Александр Владимирович Карпиков^b

^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Рапацкая Лариса Александровна, raplarisa@yandex.ru

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в анализе литолого-фациальной обстановки образования и причин изменчивости литологического состава отложений ярактинского горизонта, а также особенностей формирования и распределения в нем пород-коллекторов. В ходе работы авторами были использованы как данные результатов буровых и геофизических работ, так и материалы исследований, опубликованных в открытой печати. Ярактинский горизонт является промышленно-продуктивным на месторождениях юго-восточного склона и центральной части Непско-Ботубинской антеклизы – Дулисминском, Ярактинском, Аянском, Даниловском и других. Отложения ярактинского горизонта сформировались в начальный трансгрессивный этап вендского цикла осадконакопления и характеризуются крайней литологической невыдержанностью состава и изменениями толщин. Проведенные рядом ученых исследования свидетельствуют о том, что к началу образования ярактинского горизонта на территории его формирования в геоморфологическом плане преобладала прибрежная равнина, временами заливавшаяся морем. Породы данной площади представлены фациями временных пролювиально-делювиальных потоков прибрежной равнины, сменявшимися прибрежными мелководными отложениями. В связи с этим смена литологического состава пород и толщин ярактинского горизонта являлась следствием изменения характера колебательных движений, а его структурно-текстурные особенности определялись в основном динамикой водных потоков среди седиментации и характером палеорельефа подстилающей поверхности. В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что литологическая неоднородность ярактинского горизонта в разрезах (по вертикали) и по профилю (по латерали) определяется частым чередованием различных литотипов, формирование которых диктуется комплексным характером тектонических движений и особенностями изменения фациальных обстановок осадконакопления.

Ключевые слова: ярактинский горизонт, нефтегазоносность, литолого-фациальный анализ, седиментогенез, тектоногенез, корреляция, фильтрационно-емкостные свойства, коллектор

Для цитирования: Рапацкая Л. А., Карпиков А. В. Литолого-фациальная изменчивость ярактинского горизонта как комплексный результат геодинамических процессов тектоногенеза и седиментогенеза // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 152–161. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-152-161>.

Original article

Lithofacies variability of the Yarakta horizon as a complex result of geodynamic processes of tectonogenesis and sedimentogenesis

Larisa A. Rapatskaya^a, Alexander V. Karpikov^b

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Larisa A. Rapatskaya, raplarisa@yandex.ru

Abstract. The purpose of the research is to analyze the lithological and facies conditions of formation and the causes of lithological composition variability of the Yarakta horizon deposits as well as formation and distribution features of reservoir rocks in the horizon. The paper uses the data on drilling and geophysical work results and research materials from the public sources. The Yarakta horizon is commercially productive in the deposits of the southeastern slope and the central part of the Nepa-Botuoba antecline: Dulisminskoe, Yaraktinskoe, Ayanskoe, Danilovskoe deposits, etc. The deposits of the Yarakta horizon were formed during the initial transgressive stage of the Vendian sedimentation cycle and are

© Рапацкая Л. А., Карпиков А. В., 2022



characterized by extreme lithological irregularity of rock composition and thickness. Investigations of a number of scientists testify that in the early formation of the Yarakta horizon its territory in geomorphological terms was predominantly presented by a coastal plain, which was occasionally flooded by the sea. The rocks in the area are represented by the facies of temporary proluvial-deluvial flows of the coastal plain replaced by coastal shallow sediments. The change in the lithological composition of rocks and thicknesses of the Yarakta horizon is a result of changes in the nature of oscillatory movements, while its structural and textural features are determined mainly by the dynamics of water flows of the sedimentation medium and the paleorelief nature of the underlying surface. The conducted research allows to conclude that lithological heterogeneity of the Yarakta horizon in sections (vertically) and along the strike (laterally) is determined by the frequent alternation of various lithotypes, the formation of which is determined by the complex nature of tectonic movements and irregularity features of sedimentary layer facies.

Keywords: Yarakta horizon, oil and gas potential, lithological and facies analysis, sedimentogenesis, tectonogenesis, correlation, reservoir porosity and permeability, reservoir

For citation: Rapatskaya L. A., Karpikov A. V. Lithofacies variability of the Yarakta horizon as a complex result of geodynamic processes of tectonogenesis and sedimentogenesis. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(2):152-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-152-161>.

Введение

Наиболее известные крупные месторождения нефти и газа на Сибирской платформе приурочены в основном к склонам антеклиз древнего заложения, обращенных в сторону сопряженных одновозрастных прогибов, служивших, по-видимому, источником генерации углеводородов. Такими антеклизами являются Непско-Ботубинская и Байкитская [1–4]. Одним из самых распространенных продуктивных горизонтов на площади этих антеклиз служит ярактинский горизонт нижнемотской подсвиты нижнего венда. В данной работе авторами проведен анализ литолого-фациальной обстановки формирования и причин изменчивости литологического состава отложений ярактинского горизонта, а также особенностей формирования и распределения в нем пород-коллекторов.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования были использованы данные результатов буровых и геофизических работ, а также материалы исследований ярактинского горизонта, опубликованных в открытой печати.

Результаты исследования и их обсуждение

Отложения ярактинского горизонта промышленно продуктивны на месторождениях юго-восточного склона и центральной части Непско-Ботубинской антеклизы, таких как Дулисъминское, Ярактинское, Аянское, Даниловское и другие. Породы-коллекторы ярак-

тинского горизонта, сформировавшиеся в начальный трансгрессивный этап вендского цикла осадконакопления, отличаются крайней литологической невыдержанностью, а также изменениями толщины от 5 до 30 м на Ярактинской и Аянской площадях и от 27 до 59 м на Дулисъминской площади [5–7].

Началом изучения ярактинского горизонта послужило открытие Ярактинского нефтегазо-конденсатного месторождения в июне 1969 г., когда при испытании поисковой скважины № 5-СМ из интервала 2160–2150 м был получен приток нефти дебитом 1,5 м³/сут. Продуктивными являются терригенные отложения, выделенные в объеме от кровли фундамента до подошвы доломитов тирской свиты среднемотской подсвиты под условным названием «ярактинская пачка», которые позже стали называться ярактинским горизонтом [8–10]. На этом уровне отложения нижнемотской подсвиты промышленно продуктивны на целом ряде месторождений, например на Дулисъминском, Ярактинском, Аянском и других месторождениях, расположенных на юго-восточном склоне Непско-Ботубинской антеклизы и в ее центральной части [10].

Ярактинская базальная песчаная пачка нижнемотской подсвиты венд-раннекембрийского возраста залегает со следами размыва на отложениях фундамента, что свидетельствует о перерыве в осадконакоплениях и значительном влиянии палеорельефа на процесс ее формирования [9, 10]. В нижней части разреза отчетливо наблюдается заполнение терригенными отложениями эрозионных форм рельефа фундамента (рис. 1).

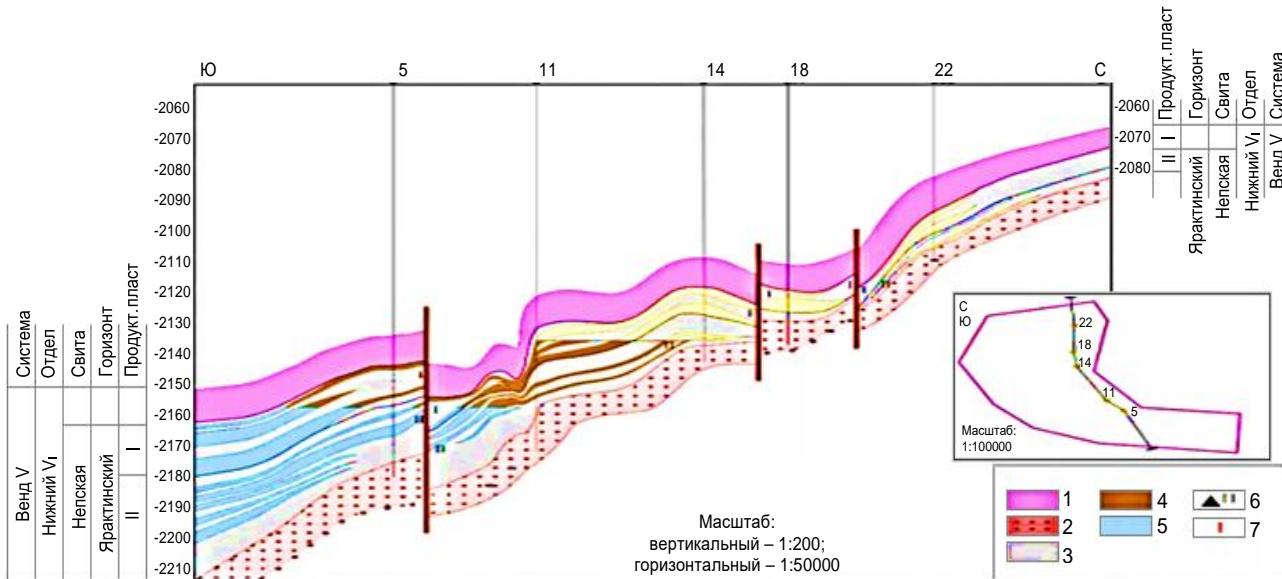


Рис. 1. Геологический разрез Ярактинского месторождения:

1 – глинисто-карбонатная покрышка; 2 – кристаллический фундамент; 3 – плотные породы;
4–5 – породы-коллекторы: 4 – нефтенасыщенные, 5 – водонасыщенные;

6 – скважины; 7 – разрывные нарушения

Fig. 1. Geological section of the Yarakta field

1 – clay-carbonate cover; 2 – crystalline basement; 3 – dense rocks;
4–5 – reservoir rocks: 4 – oil-saturated rocks, 5 – water-saturated rocks;
6 – wells; 7 – fractures

Проведенные рядом учеными исследования свидетельствуют о том, что к началу образования ярактинского горизонта на территории в геоморфологическом плане преобладала прибрежная равнина, временами заливавшаяся морем [7, 8]. Породы данной площади представлены фациями временных пролювиально-делювиальных потоков прибрежной равнины, сменявшимися прибрежными мелководными отложениями. Эти отложения с низкой степенью сортировки осадочного материала формировали линзовидные песчаные тела, вытянутые вдоль южного склона Непско-Ботубинской антеклизы, которые по направлению к своду уменьшаются по мощности и часто выклиниваются [1, 2, 11]. Такая форма тел и степень сортировки осадков определили литологическую перемежаемость «коллектор – неколлектор» в теле будущего продуктивного ярактинского горизонта.

Сложен ярактинский горизонт двумя пластами песчаников, разделенными маломощным прослоем аргиллитов, трансгрессивно залегающих в основании подсолевого комплекса осадочного чехла Сибирской платформы (рис. 2).

Отложения ярактинского горизонта представлены закономерным чередованием терригенных (в большей степени) и карбонатных (в меньшей степени) пород, образующих циклические последовательности. Мощность отложений ярактинского горизонта в пределах месторождения непостоянна и изменяется от 8 до 43 м.

Верхний продуктивный пласт песчаников ярактинского горизонта по сравнению с нижним имеет более высокую степень отсортированности песчаного материала, меньшую глинистость отложений и характеризуется лучшими фильтрационно-емкостными свойствами. Тип коллектора в данном случае – поровый. Открытая пористость верхнего пласта в среднем составляет 10 %, максимальные ее значения лежат в диапазоне 16–19 %, проницаемость же равна 0,07–0,6 мкм². Эффективная толщина – 2,4–6,9 м. Отрицательно на фильтрационно-емкостные свойства пород влияют процессы засолонения, местами ангидритизации, а также невыдержанность доли песчаников к общей толщине пласта.

Нижний пласт ярактинского горизонта представлен плохо отсортированными песча-

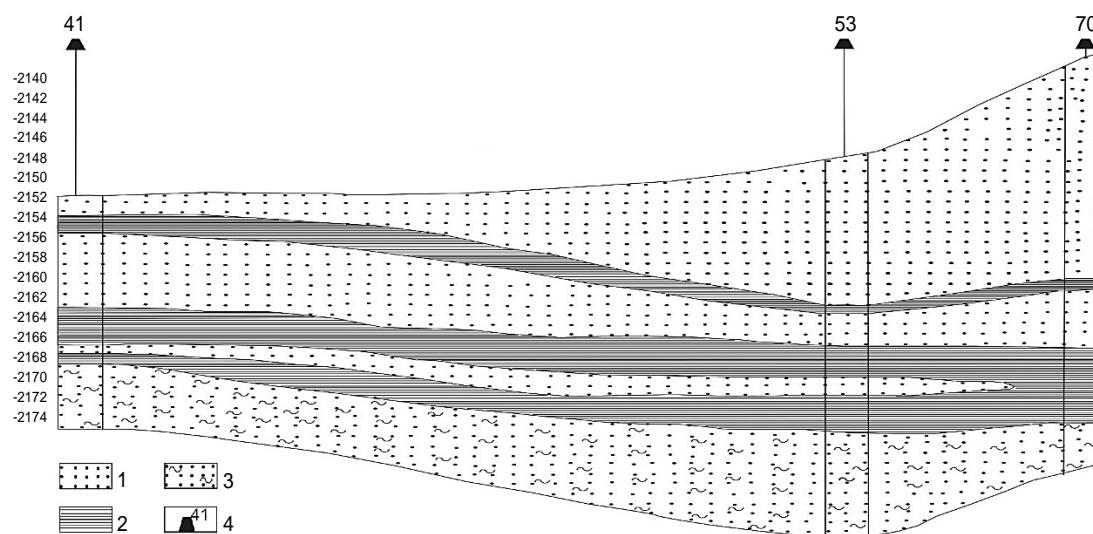


Рис. 2. Профильный геологический разрез ярактинского горизонта по линии скважин № 41-53-70 (архивные материалы ООО «Иркутская нефтяная компания»):

1 – песчаник; 2 – аргиллит; 3 – песчано-глинистые породы; 4 – скважина с номером

Fig. 2. Profile geological section of the Yarakta horizon along the line of wells no. 41-53-70

(archival materials of the Irkutsk Oil Company LLC):

1 – sandstone; 2 – mudstone; 3 – sandy and clay rocks; 4 – numbered well

никами, переслаивающимися с аргиллитами и алевролитами. Коллекторские свойства песчаников пласта невысоки. Открытая пористость проницаемых интервалов составляет в среднем 8 %, проницаемость – (6–8)–10–15 м².

Распределение продуктивной нефтегазоносности в пределах горизонта по площади месторождения определяется литологической перемежаемостью вмещающих отложений – распределением «коллектор – неколлектор».

Анализ геологической истории данных детально разбуренных месторождений с наиболее плотной сеткой разведочного горизонта «коллектор – неколлектор» диктуется определенной закономерностью, связанной с разломной тектоникой, обусловленной блоковой делимостью земной коры [1, 2].

Общий характер последовательности отложений, литологического состава и изменения толщин ярактинского горизонта иллюстрирует схема корреляции по скважинам месторождения (рис. 3). Более детальная характеристика такой последовательности наслойения (по глубине отбора керна) от грубозернистых пород неяснослоистых брекчий через песчаники с уменьшением гранулометрии состава до алевролитов и тонкозернистых доломитов представлена на рис. 4. Для отложений

ярактинского горизонта характерны пестроцветные и сероцветные гаммы окраски, определяемые окислительно-восстановительным потенциалом обстановок среды осадконакопления, а также минералогическим составом источников сноса.

Смена литологического состава пород и толщин ярактинского горизонта являлась следствием изменения характера колебательных движений, а его структурно-текстурные особенности определялись в основном динамикой водных потоков среды седиментации, которая зависела от палеорельефа подстилающей поверхности [9, 10, 12].

По сведениям В. М. Александрова и других авторов [9, 10, 12], как уже указывалось выше, в начале своего образования отложения ярактинского горизонта отлагались в условиях прибрежной равнины, временами заливавшейся морем, позднее же они стали формироваться временными пролювиально-делювиальными потоками с низкой степенью сортировки осадочного материала. Особенности формирования отложений отличаются высокой степенью литологической неоднородности, что отражается в характере разрезов по скважинам (см. рис. 2), а также в образцах керна по отдельной скважине, отобранных по глубине отбора (см. рис. 4) [13, 14].

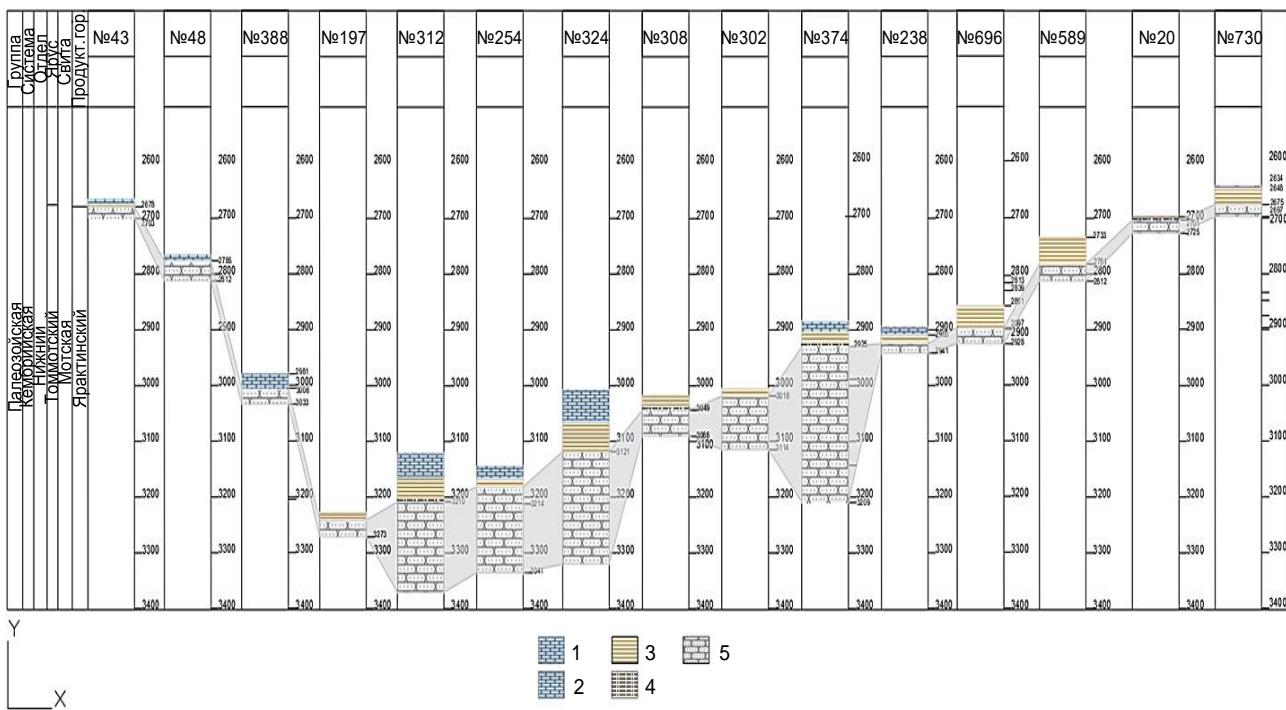


Рис. 3. Корреляция разрезов яркотинского горизонта по скважинам:
1 – доломиты; 2 – доломиты, ангидриты; 3 – аргиллиты; 4 – алевролиты; 5 – песчаники

Fig. 3. Correlation of Yaraka horizon sections by wells:
1 – dolomites; 2 – dolomites, anhydrites; 3 – mudstones; 4 – siltstones; 5 – sandstones

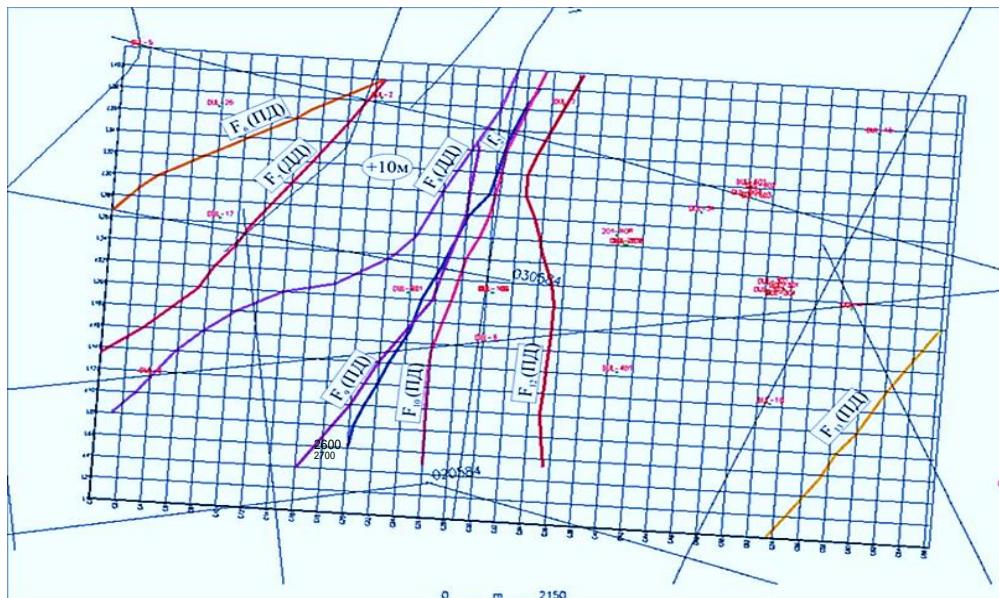


Рис. 4. Схема выявленных тектонических дислокаций:
ПД – пликативные дислокации; ДД – дизъюнктивные дислокации

Fig. 4. Diagram of identified tectonic dislocations:
ПД – plicative dislocations; ДД – disjunctive dislocations

Литологическая неоднородность в разрезах (по вертикали) и по простиранию (по латерали) определяется частым чередованием различных литотипов, подробно описанных в работе [14]: мелкообломочных гравелитов, гравелистых, крупнозернистых, среднезернистых, мелкозернистых песчаников, алевроли-

тов, разнозернистых аргиллитов и тонкозернистых доломитов (см. рис. 3). Значительные лиофациальные изменения пород горизонта отмечаются как по простиранию, так и вкрест простирания моноклинального склона антиклизы [10, 15].

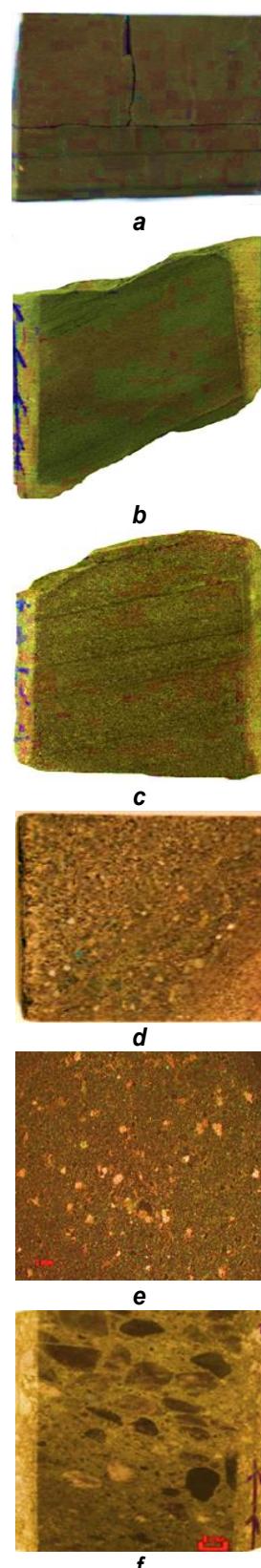


Рис. 5. Строение и состав пород ярактинского горизонта:

а – доломит микрокристаллический алевритистый с неясно выраженной сплоистой текстурой (глубина отбора – 2757,26 м); б – алевролит с наклонносплоистой текстурой оползания (глубина отбора – 2768,2 м); в – песчаник алевритовый с наклонно-волнистой текстурой (глубина отбора – 3484,09 м); г – песчаник разнозернистый с гравийной примесью косослоистый (глубина отбора – 3293,6 м); д – глинисто-карбонатная массивная порода (глубина отбора – 3475,43 м); е – брекчия с наклонносплоистой текстурой (глубина отбора – 3493,78 м)

***Fig. 5. Structure and composition of Yarakta horizon rocks:***

- a – microcrystalline siltstone dolomite with an indistinctly expressed layered texture (sampling depth is 2757.26 m);
 b – siltstone with obliquely layered slip texture (sampling depth is 2768.2 m); c – silty sandstone with oblique-wavy texture (sampling depth is 3484.09 m); d – obliquely layered consertal sandstone with gravel admixture (sampling depth is 3293.6 m); e – clay-carbonate massive rock (sampling depth is 3475.43 m);
 f – breccia with obliquely layered texture (sampling depth is 3493.78 m)

Минеральный состав литотипов ярактинского горизонта, их распределение по разрезам разных масштабов играют важную роль при изучении условий осадкоакопления [11, 16, 17]. Литолого-фациальная изменчивость отложений обусловлена сочетанием двух масштабных взаимосвязанных процессов – тектоногенеза и седиментогенеза, первый из которых достаточно убедительно отражается в представленных схемах по итогам геофизических исследований. В результате этих исследований установлено детальное трассирование возможных зон тектонических нарушений, позволяющих оценить влияние тектонического фактора на коллекторские свойства ярактинского горизонта и условия его распространения [18, 19] (см. рис. 4).

Анализ волнового поля дал основание для выделения тектонических дислокаций разных типов – пликативных и дизьюнктивных. Кроме того, было установлено, что дизьюнктивные дислокации характеризуются перемещением соседних блоков по разломам различного генезиса и масштаба, усложняющим основную слоистую структуру отложений.

Последнее указанное изменение, в свою очередь, вызвано сменой литолого-фациального состава отложений (по типу фациального замещения), толщин пластов и условий их залегания. Выявлено, что ярактинский горизонт имеет четко выраженное циклическое строение, первопричиной которого служат тектонические дислокации (см. рис. 5).

Заключение

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что установленное циклическое строение разрезов разного масштаба и направленности, обусловленное тектоническими колебаниями, характером подстилающего рельефа и особенностями седиментогенеза, определяет литолого-фациальный состав ярактинского продуктивного горизонта с выявленной перемежаемостью отложений «коллектор – неколлектор». Смена отложений с различными фильтрационно-емкостными свойствами «коллекторов – неколлекторов», в свою очередь, позволяет выявить при детальной разведке наиболее перспективные зоны нефтегазонакопления.

Список источников

1. Арчегов В. Б., Нефедов Ю. В. Критерии уникальности месторождений нефти и газа и факторы регионального контроля их формирования и размещения в древних комплексах Сибирской платформы // Высокие технологии в современной науке и технике: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Томск, 2017. С. 231–232.
2. Жарков А. М., Ануприенко А. А. Влияние блоковых перемещений фундамента на строение и нефтегазоносность базальных отложений осадочного чехла // Блоковое строение земной коры и нефтегазоносность: докл. Междунар. конф. СПб., 1994. С. 73–76.
3. Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А., Иванишин В. М., Разяпов Р. К., Данилова Е. М. Геодинамические аспекты исследования сложных горно-геологических условий бурения древнейших карбонатных резервуаров нефти и газа рифея: обзор проблемы на примере месторождений Байкитской нефтегазоносной области // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4.
4. Вахромеев А. Г., Иванишин В. М., Сверкунов С. А., Поляков В. Н., Разяпов Р. К. Глубокая скважина как стенд гидравлических «on-line» исследований напряженного состояния горного массива флюидонасыщенных трещинных коллекторов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 761–778. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>.
5. Золотов А. Н., Проничева М. В., Зиновьев А. А., Савинова Г. Н., Такаев Ю. Г. Арутюнов С. Л. Палеогеоморфологические исследования при нефтегазопоисковых работах на Сибирской платформе // Геология нефти и газа. 1983. № 7. С. 3–6.
6. Золотов А. Н., Тышенко Л. Ф. Строение и нефтегазоносность подсолевых отложений Приленского района Сибирской платформы // Геология нефти и газа. 1972. № 10. С. 8–12.
7. Данилкин С. М. О баровом теле Марковской и Ярактинской зон нефтегазонакопления // Геология



нефти и газа. 1980. № 6. С. 14–20.

8. Железнова А. П., Сидоренко А. С. Палеогеографические реконструкции при поисках литологических залежей нефти и газа на северо-востоке Иркутского амфитеатра // Нефтегазовая геология и геофизика. 1977. № 1. С. 10–15.

9. Шемин Г. Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антиклизы и Катангская седловина): монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 467 с.

10. Мельников Н. В. Венд-кембрийский соленоносный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 148 с.

11. Shulga V. V. Non-traditional hydrocarbon deposits // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 408. P. 012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012063>.

12. Александров В. М., Белкина В. А., Казанская Д. А. Концептуальная геологическая модель продуктивных отложений ярактинского горизонта // Территория «Нефтегаз». 2016. № 6. С. 30–39.

13. Казанская Д. А., Александров В. М., Белкина В. А. Моделирование геологического строения продуктивных отложений ярактинского горизонта // Территория «Нефтегаз». 2016. № 9. С. 54–60.

14. Савинкин П. Т., Кузнецов В. Г., Илюхин Л. Н., Тихомирова Г. И. Фациально-палеогеоморфологиче-

ская обстановка формирования ярактинского горизонта юго-восточной части Непско-Ботуобинской антиклизы // Геология нефти и газа. 1991. № 12. С. 8–11.

15. Постникова О. В., Соловьева Л. В., Тихомирова Г. И. Строение аллювиально-пролювиальных природных резервуаров нижнего венда южного склона Непско-Чонского мегасвода Сибирской платформы // Нефтяное хозяйство. 2008. № 2. С. 24–27.

16. Rapatskaya L. A., Tonkikh M. E., Ustyuzhanin A. O. Natural reservoir as a geological body for storing helium reserves // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 408. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012060>.

17. Коновалцева Е. С. Литологические особенности и условия осадконакопления базальных отложений венда склонов Непско-Ботуобинской и Байкитской антиклизы // Концептуальные проблемы литологических исследований в России: материалы VI Всерос. литолог. совещ. Казань, 2011. С. 388–391.

18. Постникова О. В., Постников А. В., Коновалцева Е. С., Топорков В. Г., Савченко С. И. Вторичные процессы в породах-коллекторах ярактинского горизонта юго-восточного склона Непско-Ботуобинской антиклизы // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 5. С. 505–509.

19. Тугарина М. А. Гидрогеологические особенности разломных зон юга Восточной Сибири // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. № 7. Ташкент: Изд-во ИС АН РУз, 2010. С. 180–184.

References

1. Archegov V. B., Nefedov Yu. V. Uniqueness criteria of oil and gas fields and regional control factors of their formation and location in ancient complexes of the Siberian platform. In: *Vysokie tekhnologii v sovremennoi nauke i tekhnike: materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = High technologies in modern science and engineering: proceedings of the 6th International scientific and technical conference*. Tomsk; 2017, p. 231–232. (In Russ.).
2. Zharkov A. M., Anuprienko A. A. Influence of basement block movements on the structure and oil and gas content of basal formations of the sedimentary cover. In: *Blokovoe stroenie zemnoi kory i neftegazonosnost': dokl. Mezhdunar. konf. = Block structure of the earth's crust and oil and gas content: reports of the International conference*. Saint Petersburg; 1994, p. 73–76. (In Russ.).
3. Vakhromeev A. G., Sverkunov S. A., Ivanishin V. M., Razyapov R. K., Danilova E. V. Geodynamic aspects in the study of complex mining and geological conditions for drilling into oil-and-gas reservoirs in the Riphean carbonate rocks: an overview of the problem as exemplified by the deposits in the Baikit petrolierous district. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(4):903–921. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0323>.
4. Vakhromeev A. G., Ivanishin V. M., Sverkunov S. A., Polyakov V. N., Razyapov R. K. Deep well as a facility for on-line hydraulic studies of the stress state of the rock mass in fluid-saturated fractured reservoirs. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):761–778. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>.
5. Zolotov A. N., Pronicheva M. V., Zinov'ev A. A., Savinova G. N., Takaev Yu. G. Arutyunov S. L. Paleogeomorphological studies under oil and gas exploration on the Siberian platform. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1983;7:3–6. (In Russ.).
6. Zolotov A. N., Tyshchenko L. F. Structure and oil and gas content of subsalt deposits of the Prilensky district of the Siberian platform. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1972;10:8–12. (In Russ.).
7. Danilkin S. M. On the bar body of Markovskaya and Yaraktinskaya zones of oil and gas accumulation. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1980;6:14–20. (In Russ.).
8. Zheleznova A. P., Sidorenko A. S. Paleogeographic reconstructions in the search for lithological oil and gas deposits in the northeast of the Irkutsk amphitheater. *Neftegazovaya geologiya i geofizika*. 1977;1:10–15. (In Russ.).
9. Shemin G. G. Geology and petroleum potential of Vendian and Lower Cambrian deposits in the central areas of the Siberian platform (Nepa – Botuoba anticline, Baykit-skaya anticline and Katanga saddle). Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007. 467 p. (In Russ.).
10. Mel'nikov N. V. Vendian-Cambrian saline basin of the Siberian platform (stratigraphy, evolution history).



Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. 148 p. (In Russ.).

11. Shulga V. V. Non-traditional hydrocarbon deposits. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science.* 2020;408:012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012063>.

12. Alexandrov V. M., Belkina V. A., Kazanskaya D. A. Conceptual geological model of Yarakta horizon production deposits. *Territorija "Neftegas" = Oil and Gas Territory.* 2016;6:30-39. (In Russ.).

13. Kazanskaya D. A., Alexandrov V. M., Belkina V. A. Simulation of the productive deposits geological structure in Yarakta horizon. *Territorija "Neftegas" = Oil and Gas Territory.* 2016;9:54-60. (In Russ.).

14. Savinkin P. T., Kuznetsov V. G., Ilyukhin L. N., Tikhomirova G. I. Facial paleo-geomorphological setting of Yarakta horizon formation in the south-eastern part of the Nepa-Botuoba antecline. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology.* 1991;12:8-11. (In Russ.).

15. Postnikova O. V., Solovjeva L. V., Tikhomirova G. I. Morphology of alluvial-proluvial natural reservoirs of Lower Vendian of southern slope of Nepsko-Chonskiy megaaarch of the Siberian platform. *Neftyanoe khozyaistvo.* 2008;2:24-27. (In Russ.).

16. Rapatskaya L. A., Tonkikh M. E., Ustyuzhanin A. O. Natural reservoir as a geological body for storing helium reserves. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science.* 2020;408:012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012060>.

17. Konoval'tseva E. S. Lithological features and sedimentation conditions of Vendian slopes basal deposits of the Nepa – Botuoba and Baykitskaya anteclines. In: *Konseptual'nye problemy litologicheskikh issledovanii v Rossii: materialy VI Vseros. litolog. soveshch. = Conceptual problems of lithological researches in Russia: materials of the 6th All-Russian lithological meeting.* Kazan; 2011, p. 388–391. (In Russ.).

18. Postnikova O. V., Postnikov A. V., Konoval'tseva E. S., Toporkov V. G., Savchenko S. I. Secondary processes in reservoir rocks of the Yarakta horizon on the southeastern slope of the Nepa-Botuoba antecline. *Litologiya i poleznye iskopaemye.* 2011;5:505-509. (In Russ.).

19. Tugarina M. A. Hydrogeological features of fault zones in the south of Eastern Siberia. *Problemy seismologii v Uzbekistane = The problems of seismology in Uzbekistan.* Iss. 7. Tashkent: Seismology Institute of the Academy of sciences of the Republic of Tajikistan; 2010, p. 180–184. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Рапацкая Лариса Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
профессор кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
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 Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
raplarisa@yandex.ru.



Карпиков Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
karpikov@istu.edu.

Alexander V. Karpikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Oil and Gas Engineering Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
karpikov@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 16.02.2022; одобрена после рецензирования 01.04.2022; принятa к публикации 04.05.2022.

The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 01.04.2022; accepted for publication 04.05.2022.



BENEFICIATION AND PROCESSING OF MINERALS

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-162-171>

Study of gold ore processing by flotation methods

Pavel K. Fedotov^a, Alexander E. Burdonov^b, Yuriy V. Novikov^c,
 Nikita V. Terentiev^d, Ilya O. Bogdanyuk^e

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

Corresponding author: Yuriy V. Novikov, 89500505553r@gmail.com

Abstract. The article deals with the studies of gold-bearing ore beneficitation by flotation methods. The object of the study is a low-sulfide gold-quartz type of ores with the following petrographic composition: quartz – 90 %, quartz-chlorite schists – 10 %. The ore from this deposit consists of the weathering crust rocks including iron-mica rocks with veins and spots of granoblastic quartz. The purpose of the research is to develop an optimal flotation regime for obtaining sulfide gold-bearing concentrate. The influence of ore size, reagent mode, flotation redistribution structure, and flotation time on operations was recorded during the experiment. The paper presents the results of studying the chemical composition of the ore by the method of silicate and optical emission analysis. The flotation process used butyl potassium xanthate as a collector and a combination of pine essential oils as a foaming agent. The Hancock concentration efficiency criterion was determined based on a series of experiments. The following technological indicators of ore processing were identified: gravity concentrate with the gold grade of 1165 g/t with the yield of 0.3 % and the recovery of 73.74 %; flotation concentrate (after purification II) with the gold grade of 68.9 g/t with the yield of 1.52 % and a recovery of 22.05 %. Its silver content was 15.9 g/t. The total gold recovery was 95.79 %, with the yield of 1.82 % and the gold grade of 249.9 g/t. The gold grade in the flotation tailings was 0.19 g/t.

Keywords: gold, ore, flotation, concentrate, tailings, recovery, material composition, technological research

For citation: Fedotov P. K., Burdonov A. E., Novikov Yu. V., Terentiev N. V., Bogdanyuk I. O. Study of gold ore processing by flotation methods. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(2):162-171.
<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-162-171>.

ОБОГАЩЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 622.765

Исследование переработки руд золоторудного месторождения флотационными методами

Павел Константинович Федотов^a, Александр Евгеньевич Бурдонов^b,
 Юрий Витальевич Новиков^c, Никита Витальевич Терентьев^d,
 Илья Олегович Богданюк^e

^{a-e}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
 Автор, ответственный за переписку: Новиков Юрий Витальевич, 89500505553r@gmail.com

Резюме. В представленной статье описано исследование обогащения золотосодержащих руд флотационными методами. Объектом изучения являлся малосульфидный золото-кварцевый тип руд, который имеет следующий петрографический состав: кварц – 90 %, кварц-хлоритовые сланцы – 10 %. Руда этого месторождения состоит из пород коры выветривания – железисто-слюдяных пород с прожилками и пятнами гранобластового кварца. Целью исследования стала разработка оптимального режима флотации для получения сульфидного золотосодержащего концентрата. В ходе эксперимента фиксировалось влияние крупности руды, реагентного режима, структуры перераспределения флотации, времени флотации на операции. В работе представлены результаты исследования химического состава руды методом силикатного и оптико-эмиссионного анализа. В процессе флотации в качестве сорбатора использовали такие реагенты, как бутиловый ксантофенат калия, а в качестве пенообразователя –

© Fedotov P. K., Burdonov A. E., Novikov Yu. V., Terentyev N. V., Bogdanyuk I. O., 2022



комбинацию эфирных масел сосны. На основе серии экспериментов был установлен критерий эффективности обогащения Хэнкока. Выявлены следующие технологические показатели переработки руды: гравиоконцентрат с содержанием золота 1165 г/т с выходом 0,3 % и извлечением 73,74 %; флотоконцентрат (после второй очистки) с содержанием золота 68,9 г/т с выходом 1,52 % и извлечением 22,05 %. Содержание серебра в нем составило 15,9 г/т. Общее извлечение золота составило 95,79 % при выходе 1,82 % и содержании золота 249,9 г/т. Содержание золота в хвостах флотации составило 0,19 г/т.

Ключевые слова: золото, руда, флотация, концентрат, хвосты, извлечение, вещественный состав, технологические исследования

Для цитирования: Федотов П. К., Бурдонов А. Е., Новиков Ю. В., Терентьев Н. В., Богданюк И. О. Исследование переработки руд золоторудного месторождения флотационными методами // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 162–171. (In Engl.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-162-171>.

Introduction

The main source of gold is primary gold deposits, and for all types of ores of such deposits, complex technological processing processes have been formed. From the analysis of works [1–4], it can be concluded that the most common technology for processing oxidized and gold-bearing sulfide ores are the gravity-flotation schemes with subsequent metallurgical redistribution.

Each of the above-mentioned technological processes has its advantages and disadvantages. A special place among them is occupied by flotation due to the large number of factors affecting the efficiency of the process. One of the main parameters is the recovery size before flotation [5, 6]. The reagent mode also influences the efficiency of the process, the degree of pulp aeration, flotation time, pH of the medium, conditioning, pulp density [7, 8], and many others [9–13].

The purpose of the research was to work out the optimal flotation mode for obtaining sulfide gold-bearing concentrate, namely, to study the size of ore grinding, reagent mode, and the structure of the flotation redistribution, and the flotation time for operations. It should be noted that the work is a continuation of the theme of developing

a technology for processing gold-bearing ores. Studies of washability by gravity methods are presented in [14]

Materials and methods

The object of research is a low-sulfide gold-quartz type of ore with the following petrographic composition: quartz – 90 %, quartz-chlorite shale – 10 %.

The starting material and enrichment products were investigated using assay-atomic absorption, atomic-emission, X-ray phase analysis methods, and electron microscopy.

The ore of this deposit consists of the rock of the weathering crust – ferruginous-mica rocks with veins and spots of granoblastic quartz. To determine the chemical composition, silicate and optical emission analyzes of the deposit ore were performed (Table 1). The content of noble metals was determined by assay analysis [15].

More than 60 % of the ore consists of aluminum and silicon oxides. By the content of sulfide sulfur (0.35 %), the ore can be attributed to poor sulfide. ICP-OES analysis showed a low content of harmful impurities in the ore. The As content is 0.47 %, and the antimony content is less than 5 g/t. The average gold grade in the ore is 4.56 g/t, and the silver grade is 2 g/t. It has been

Table 1. Analysis results of ore silicates

Таблица 1. Результаты анализа силикатов руды

Elements and connections	Content, %	Elements and connections	Content, %
SiO ₂	52.4	TiO ₂	1.73
Al ₂ O ₃	9.9	CaO	1.71
Fe	11.6	S general	0.37
MgO	1.83	S sulfide	0.35
As	0.46	Na ₂ O	1.16
Cu	0.04	P ₂ O ₅	0.22
K ₂ O	1.21	Zn	0.04
MnO	0.15	Cr ₂ O ₃	0.01



established that ore with a size of -15 mm is characterized by a low yield of small-sized grades (the content of steps less than 0.2 mm is 9.91 %). The gold content in different size classes is different. For ore with size -15 mm, the metal content is in the range from 1.44 to 6.9 g/t; for ore -2 mm – from 2.8 to 4.3 g/t. Gold in ore is mainly found in significant grades, so in the +0.5 mm grade for ore with a size of -15 mm, there is 85.94 % of the metal, for ore -2 mm – 49.12 %. The share of free gold in ore with a size of -2 mm and 95 % -0.074 mm is respectively – 7.57 and 74.17 %, available for cyanidation – 74.67 and 96.93 %. The minerals and quartz insoluble in aqua regia contain 2.87 and 1.02 % of the metal, respectively [15].

Results and their discussion

To determine the optimal degree of grinding of gravity tailings for flotation concentration, a series of tests was carried out on material with a particle size of 70, 80, 85, 90 and 95 % -0.071 mm. The operations of the main and control flotation were carried out. Experimental conditions: Main flotation: Potassium butyl xanthate (PBX) = 300 g/t, Pine oil (PO) = 20 g/t, flotation time 5 min. Control flotation: PBX = 150 g/t, PO = 20 g/t, time – 5 minutes.

It was found that the efficiency of concentration increases to the size of ore grinding 90 % -0.071 mm. With finer grinding, the efficiency begins to decrease slightly. This indicates that a slight increase in gold recovery is achieved due to a significantly more significant increase in the concentrate yield, namely: an increase in output by 0.8 % gives an increase in gold recovery by 0.36 %. Therefore, the size of the crushing of gravity tailings equal to 90 % -0.071 mm was taken as optimal for flotation.

It is known from the practice of flotation of sulfide minerals that the creation of an acidic environment often has an activating effect on flotation and, at the same time, leads to a decrease in the yield of concentrate [16–20].

In this connection, a series of tests were delivered to clarify the optimal pH value of the pulp for flotation when using sulfuric acid as a regulating reagent. The natural pH in the cell was 8.35 and was subsequently reduced to 5.61 and 4.57 by the addition of sulfuric acid. The reagent mode was by the flow of the medium regulator. The size

of ore grinding was chosen at 85 % -0.071 mm. It was found that a decrease in the pH of the pulp from 7.85 to 4.57 leads to a reduction in the yield of the flotation concentrate from 6.4 to 2.4 % while reducing the recovery of gold into the focus of the leading flotation from 80.66 % to 61.76. At the same time, the Hancock enrichment efficiency criterion also decreased from 74.26 to 59.36. Therefore, lowering the pH of the slurry hurts the flotation results.

It was found that the pH value of water should not be higher than 8.5 to prevent the depression of iron-containing sulfides (pyrite and arsenopyrite), which are gold carriers. This is already known: at high pH, pyrite and arsenopyrite begin to depress. An increase in pH above this value will contribute to a decrease in the recovery of arsenopyrite, the content of fine gold which reaches 20 g/t, and then pyrite, which may also contain fine gold. Together, this will lead to a decrease in gold recovery into concentrate. Obtained data well known to researchers.

To clarify the consumption of xanthate, a series of tests were performed on gravity tailings with a particle size of 90 % -0.071 mm, in which the consumption of PBX varied from 100 to 400 g/t. Flotation was carried out in a natural environment at pH = 7.85. The main and control flotation time was taken, equal to 5 minutes.

It was found that the maximum value of the concentration efficiency and the highest gold recovery in concentrate correspond to the consumption of the PBX equal to (400+200) g/t. Taking into account that the enrichment indicators in the last test (400+200 g/t) only slightly differ from the indicators of the previous test (300+150), a further increase in the collector consumption was considered inappropriate. Therefore, the consumption of the PBX, equal to (400+200) g/t, was considered optimal for further research. Experimental conditions: grinding size 90 % -0.071 mm. Main flotation: PBX, CM = 60, flotation time 5 min. Control flotation: PBX, PO = 20 g/t, time – 5 minutes.

To determine the optimal flotation time for operations at the selected collector flow rate, tests were performed to study the kinetics of the main, control and cleaning operations of flotation. In all tests, a fractional survey of concentrates was performed and the gold content was deter-



mined in each fraction. The tests were carried out on the optimal reagent mode with the ore grinding size 90 % -0.071 mm. The results of the experiments are shown in Tables 2 and 3.

Analysis of the results obtained made it possible to determine the optimal flotation time for the operations:

– Primary flotation 10–12 minutes; exceeding this time does not give a tangible increase in the extraction of gold into a concentrate and leads to dilution of the concentrate;

– Control flotation 9–11 minutes; after this time, the extraction of gold into the middling product of the control flotation practically stops;

– First clean-up flotation is 3–5 minutes; exceeding this time leads to a sharp decrease in the quality of the concentrate;

– The high gold content in the first fraction of the cleaning operation, which is almost twice the average content in the concentrate, indicates the advisability of including the second cleaning operation in the flotation scheme.

At the optimal modes established at the prospecting stage of research, an experiment was set up for flotation of gravity separation tailings in an open cycle to clarify the concentration indicators. The flotation scheme included the principal, control, and two cleaning operations (Table 4).

Experimental conditions: particle size 90 % -0.071 mm. Main flotation: PBX = 400 g/t, PO = 60 g/t, flotation time 10 min. Control flotation with kinetics: PBX = 200 g/t, PO = 20 g/t, flotation time 10 min. Cleaner flotation I: time 5 minutes. Cleaner flotation II: time 2 minutes.

Table 2. Study results of kinetics of the main and control ore floatations

Таблица 2. Результаты изучения кинетики основной и контрольной флотаций руды

Products	Time, m	Yield	Gold content, g/t	Gold extraction, %	Progressive total			Hancock criterion
					Yield, %	Gold content, g/t	Gold extraction, %	
Flotation concentrate	1	1.3	52.5	61.73	1.3	52.5	61.73	60.43
	2	2.6	8.4	19.75	3.9	23.1	81.48	77.58
	3	2.6	1.32	3.1	6.5	14.39	84.58	78.08
	4	1.5	1.22	1.66	8	11.92	86.24	78.24
Total flotation concentrate		8	11.92	86.24	–	–	–	–
Control flotation concentrate	1	0.8	0.93	0.67	0.8	0.93	0.67	–
	2	1.4	0.59	0.75	2.2	0.71	1.42	–
	3	2.3	0.47	0.98	4.5	0.59	2.4	–
	4	1.5	0.35	0.47	6	0.53	2.87	–
Total control flotation concentrate		6	0.53	2.87	–	–	–	–
Total primary and control flotation concentrate		14	7.04	89.11	–	–	–	–
Flotation tails		86	0.14	10.89	–	–	–	–
Total gravity tailings		100	1.11	100	–	–	–	–

Table 3. Study results of ore flotation kinetics

Таблица 3. Результаты изучения кинетики флотации руды

Product	Yield, %	Gold content, g/t	Gold extraction, %
Scrap concentrate 1 min	1.1	64.2	64.81
Scrap concentrate 2 min	1.1	13.1	13.22
Scrap concentrate 3 min	0.5	4.2	1.93
Total re-flotation concentrate	2.7	32.27	79.96
Re-flotation industrial product	5.2	1.24	5.92
Industrial product control flotation	5	0.64	2.94
Total concentrate	12.9	7.5	88.81
Flotation tailings	87.1	0.14	11.19
Total gravity tailings	100	1.09	100

**Table 4. Results of an open experiment on flotation of gravity beneficiation tailings**

Таблица 4. Результаты открытого эксперимента по флотации хвостов гравитационного обогащения

Product	Yield, %	Gold content, g/t	Gold extraction, %
Recycling flotation concentrate II	1.4	58.1	72.2
Industrial product recycle flotation II	1.8	5.4	8.63
Industrial product recycle flotation I	4.3	1.54	5.88
Flotation control industrial product	5.1	0.71	3.21
Total flotation concentrate	12.6	8.04	89.92
Flotation tailings	87.4	0.13	10.08
Total gravity tailings	100	1.13	100

It was found that after the second cleaning, a concentrate with a gold content of 58.1 g/t with a yield of 1.4 % can be obtained from the tailings of gravity concentration. The total recovery of gold in flotation products was 89.92 %, with an output of 12.6 %. The gold content in the tailings of the control flotation was 0.13 g/t. These results can be considered satisfactory. In the selected mode, conducting an experiment in a closed cycle is advisable to establish the ore concentration indices according to the gravity-flootation scheme.

Experience in the gravity-flootation concentration of the original ore. To establish the indicators of the initial ore beneficiation according to the gravity-flootation scheme, a test was performed in which flotation was performed with the return of middlings (5 closed cycles) according to the mode worked out at the preliminary stage of research. The flotation was fed with the tailings of gravity separation, performed on a Knelson centrifugal concentrator. The scheme of the experiment is shown in Figure.

The original ore was crushed to a 60 % -0.071 mm particle size and enriched by centrifugal separation to extract free gold and rich intergrowths. The tails of centrifugal separation were re-crushed to a particle size of 85 % -0.071 mm and fed to flotation, in which the main, control, and two cleaning operations were provided. The flotation was carried out in a closed cycle with a turnover of middlings. The results of ore dressing according to this scheme are shown in Table 5.

As a result of enrichment, the following products were obtained:

1. Gravity concentrate with a gold grade of 186 g/t with a yield of 1.84 % and a recovery of 72.82 %.
2. Flotation concentrate (after the II cleaning)

with a gold content of 70.3 g/t yields 1.46 % and recovery of 21.84 %.

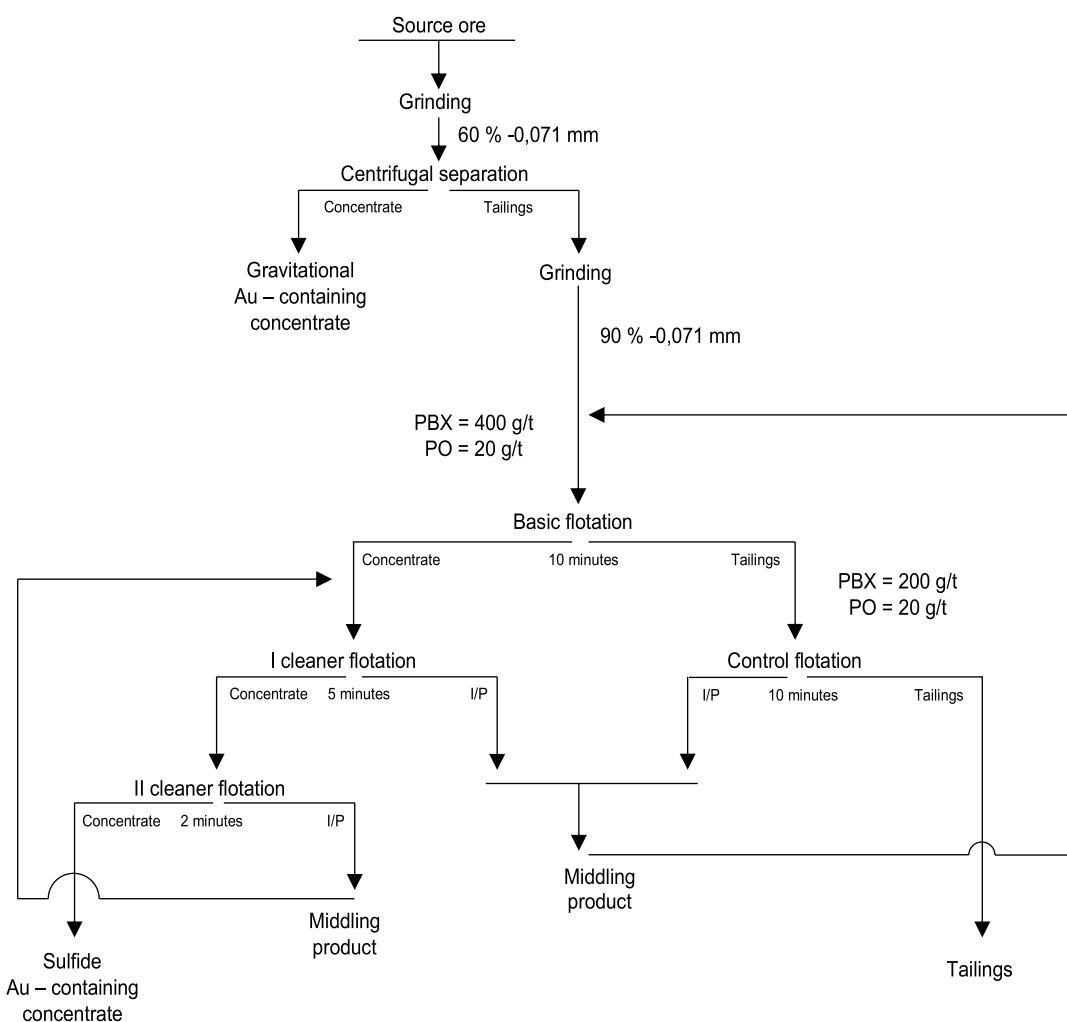
The total recovery of gold into the gravity concentrate and flotation concentrate of the II cleaning up was 94.66 %, with a yield of 3.3 % and an Au content of 134.81 g/t. The gold content in the flotation tailings was 0.2 g/t.

Due to the turnover of middlings, it became possible to reduce the consumption of the foaming agent in the main operation from 60 to 20 g/t while maintaining foaming. This consumption was adopted when performing a closed experiment on an enlarged ore sample.

Experience in the gravity-flootation concentration of the original ore on the enlarged sample. To clarify the technological parameters of the gravity-flootation ore concentration and the production of concentrates for hydrometallurgical research, a closed experiment was set up on an enlarged sample (90 kg). The scheme and the reagent mode were adopted similar to a fast experiment on five weighed samples of ore, but flotation was carried out on machines of larger volume with chambers of 12 l, 3 l, and 1.5 l.

The experiment was carried out on a circulating water supply, organized according to a "short" scheme. In this case, water for the needs of flotation was taken from the settled tail products. Fresh water was used only for the first closed-loop test. As a result of enrichment of the enlarged sample of ore, the following effects were obtained:

1. Gravity concentrate with a gold content of 1165 g/t with a yield of 0.3 % and an extraction of 73.74 %.
2. Flotation concentrate (after the II cleaning) with a gold content of 68.9 g/t with an output of 1.52 % and an extraction of 22.05 %. Its silver content was 15.9 g/t.



Flow diagram of a closed experiment on gravity-flotation ore beneficiation

Схема проведения закрытого эксперимента по гравитационно-флотационному обогащению руд

Table 5. Ore beneficiation results according to the gravity-flotation scheme (closed experiment)

Таблица 5. Результаты обогащения руды по гравитационно-флотационной схеме (закрытый эксперимент)

Product	Yield	Gold content, g/t	Gold extraction, %	Ferrum content, %	Ferrum extraction, %	Sulfur content, %	Sulfur extraction, %
Grinding ore to a particle size of 60 % -0.071 mm. Enrichment by centrifugal separation at KS MD3							
Gravity concentrate	1.84	186	72.82	17.55	8	6.58	31.32
Grinding to a particle size of 90 % -0.071 mm. Main flotation: butyl xanthate = 400 g/t, pine oil = 20 g/t, flotation time 10 min. Control flotation: butyl xanthate = 200 g/t, pine oil = 20 g/t, flotation time 10 min. I cleaning: flotation time 5 minutes II cleaning: flotation time 2 minutes							
Concentrate II cleaning	1.46	70.3	21.84	27	9.76	13.21	49.9
Industrial product recycle flotation II	0.32	10.6	0.72	21.36	1.69	5.14	4.26
Industrial product recycle flotation I	1.02	1.54	0.33	10.05	2.54	1.12	2.96
Flotation control industrial product	0.98	1.27	0.26	8.32	2.02	0.71	1.8
Total flotation concentrate	3.78	28.8	23.16	17.11	16.02	6.02	58.91
Gravity and flotation concentrate II cleaning	3.3	134.81	94.66	21.73	17.76	9.51	81.22
Tailings	94.38	0.2	4.02	3.25	75.98	0.04	9.77
Initial ore	100	4.7	100	4.04	100	0.39	100



The total recovery of gold in the gravity concentrate and flotation concentrate of the II cleaning was 95.79 %, with a yield of 1.82 % and an Au content of 249.9 g/t. The gold content in the flotation tailings was 0.19 g/t.

Conclusions

Flotation beneficiation of the initial ore sample proceeds ineffectively due to a large amount of sizeable free gold in the ore, which is poorly extracted into a foam product. The overall level of gold recovery into flotation concentrate in all experiments remained relatively low, in the range of 49.13 – 76.36 %.

In a closed experiment on the enrichment of an enlarged sample of ore, the following ore enrichment indicators were obtained:

- Gravity concentrate with a gold content of 1165 g/t with an output of 0.3 % and an extraction of 73.74%; its silver content was 274 g/t;
- Flotation concentrate (after the II cleaning) with a gold content of 68.9 g/t with an output of 1.52 % and an extraction of 22.05%; its silver content was 15.9 g/t;
- The total recovery of gold in the gravity-flootation concentrate was 95.79 %, with a yield of 1.82 % and an Au content of 249.9 g/t;
- Gold content in flotation tailings is 0.19 g/t.

References

1. Algebraistova N. K., Samorodskiy P. N., Kolotushkin D. M., Prokopyev I. V. Technology of gold recovery from gold-bearing technogenic raw materials. *Obogashchenie rud.* 2018;1:33-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2018.01.06>.
2. Molmakova M. S., Nogaeva K. A., Tusupbaev N. K., Abdykirova G. Zh. Gravity-flootation of copper ore gold. *Nauka i novye tekhnologii.* 2012;7:35-38. (In Russ.).
3. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Analysis of industrial studies of gold ores of a Chukotka deposit. *Obogashchenie rud.* 2018;2:23-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2018.02.05>.
4. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Dressability study for polymetallic ore deposits of the Zabaikalye Territory. *Obogashchenie rud.* 2019;3:3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2019.03.01>.
5. Kuptcova A. V., Nagaeva S. P., Poperechnikova O. Yu. Granulometric and morphological features of gold extraction into flotation concentrates. *IMPC 2018-EXPO: 29th International Mineral Processing Congress.* Saint Petersburg; 2019, p. 116–124.
6. Bakalarz A. Chemical and mineral analysis of flotation tailings from stratiform copper ore from Lubin Concentrator Plant (SW Poland). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* 2019;40(6):437-446. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1667778>.
7. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Kayumov A. A. Gold recovery methods under concentration of refractory gold-bearing pyritic copper-zinc ores. Part 1. Analysis of practice and choice of methods of selective recovery of gold mineral phases from pyritic copper-zinc ores. *Tsvetnye metally.* 2017;4:11-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.04.01>.
8. Chanturia V. A., Nedosekina T. V., Gapchich A. O. Improving gold flotation selectivity by using new collecting agents. *Journal of Mining Science.* 2012;48(6):1031-1038. <https://doi.org/10.1134/S1062739148060111>.
9. Wang L., Peng Y., Runge K., Bradshaw D. A review of entrainment: mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering.* 2015;70:77-91.
10. Mlynarczykowska A., Nyrek A., Oleksik K. Analysis of the gas phase in flotation process. Part 1: Experimental determination of the volume of air bubbles in the pneumomechanical flotation machine. *Inżynieria Mineralna.* 2015; 16(1):181-188.
11. Matveeva T. N., Gromova N. K., Lantsova L. B. Developing a selective flotation process for antimony and arsenic sulfides in complex gold ore processing. *Tsvetnye metally.* 2019;4:6-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.04.01>.
12. Ran J., Qiu X., Hu Z., Liu Q., Song B., Yao Y. Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology.* 2019;344:654-664. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045>.
13. Bas A. D., Larachi F. The effect of flotation collectors on the electrochemical dissolution of gold during cyanidation. *Minerals Engineering.* 2019;130:48-56. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.003>.
14. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. A study of gold ore for processability by gravity separation techniques. *Tsvetnye metally.* 2021;2:8-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.02.01>.
15. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Concentration studies for low sulfide ores. *Obogashchenie rud.* 2020;1:23-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2020.01.03>.
16. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., D'yachkov F. G. Collecting properties of diisobutyl dithiophosphinate in sulfide minerals flotation from sulfide ore. *Journal of Mining Science.* 2013;49(5):795-802. <https://doi.org/10.1134/S1062739149050146>.
17. Ivanova T. A., Ryazantseva M. V., Zimbovskiy I. G. The effect of modifiers on the adsorption activity of diantipyrylmethane in flotation of sulfide minerals and cassiterite. *Tsvetnye metally.* 2018;9:12-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.09.01>.
18. Chanturiya V. A., Vigdergauz V. E. *Electrochemistry of sulfides: flotation theory and practice.* Moscow:



Nauka; 1993. 205 p. (In Russ.).

19. Davari M. R., Movahed S. O. The Flotation by selected depressants as an efficient technique for separation of a mixed acrylonitrile butadiene styrene, polycarbonate and polyoxymethyleneplastics in waste streams. *Journal of Polymers and the Environment*. 2019;27(8):1709-1720. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01467-2>.

20. Seng S., Tabelin C. B., Makino Y., Chea M., Phengsaart T., Park I., et al. Improvement of flotation and suppression of pyrite oxidation using phosphate-enhanced galvanic microencapsulation (GME) in a ball mill with steel ball media. *Minerals Engineering*. 2019;143:105931. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105931>.

Список источников

1. Алгебраистова Н. К., Самородский П. Н., Колотушкин Д. М., Прокопьев И. В. Технология извлечения золота из золотосодержащего техногенного сырья // Обогащение руд. 2018. № 1. С. 33–37. <https://doi.org/10.17580/or.2018.01.06>.
2. Молмакова М. С., Ногаев К. А., Тусупбаев Н. К., Абдыкирова Г. Ж. Гравитационно-флотационное обогащение золотомедной руды // Наука и новые технологии. 2012. № 7. С. 35–38.
3. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Анализ технологических исследований золотосодержащих руд месторождения Чукотки // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 23–29. <https://doi.org/10.17580/or.2018.02.05>.
4. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследование обогатимости полиметаллической руды месторождения Забайкальского края // Обогащение руд. 2019. № 3. С. 3–9. <https://doi.org/10.17580/or.2019.03.01>.
5. Kuptsova A. V., Nagaeva S. P., Poperechnikova O. Yu. Granulometric and morphological features of gold extraction into flotation concentrates // IMPC 2018-EXPO: 29th International Mineral Processing Congress. Saint Petersburg, 2019. P. 116–124.
6. Bakalarz A. Chemical and mineral analysis of flotation tailings from stratiform copper ore from Lubin Concentrator Plant (SW Poland) // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Vol. 40. Iss. 6. P. 437–446. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1667778>.
7. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А. Методы извлечения золота при обогащении упорных золотосодержащих колчеданных медно-цинковых руд. Часть 1. Анализ практики и выбор направлений селективного выделения минеральных фаз золота из колчеданных медно-цинковых руд // Цветные металлы. 2017. № 4. С. 11–16. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.04.01>.
8. Chanturia V. A., Nedosekina T. V., Gapchich A. O. Improving gold flotation selectivity by using new collecting agents // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48. Iss. 6. P. 1031–1038. <https://doi.org/10.1134/S1062739148060111>.
9. Wang L., Peng Y., Runge K., Bradshaw D. A review of entrainment: mechanisms, contributing factors and modelling in flotation // Minerals Engineering. 2015. Vol. 70. P. 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.003>.
10. Mlynarczykowska A., Nyrek A., Oleksik K. Analysis of the gas phase in flotation process. Part 1: Experimental determination of the volume of air bubbles in the pneumatic flotation machine // Inzynieria Mineralna. 2015. Vol. 16. Iss. 1. P. 181–188.
11. Матвеева Т. Н., Гролова Н. К., Ланцова Л. Б. Разработка метода селективной флотации сульфидов сурьмы и мышьяка при обогащении комплексных золотосодержащих руд // Цветные металлы. 2019. № 4. С. 6–12. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.04.01>.
12. Ran J., Qiu X., Hu Z., Liu Q., Song B., Yao Y. Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead // Powder Technology. 2019. Vol. 344. P. 654–664. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045>.
13. Bas A. D., Larachi F. The effect of flotation collectors on the electrochemical dissolution of gold during cyanidation // Minerals Engineering. 2019. Vol. 130. P. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.003>.
14. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Результаты исследования руды золоторудного месторождения на обогатимость гравитационными методами // Цветные металлы. 2021. № 2. С. 8–16. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.02.01>.
15. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследование обогатимости убогосульфидных руд // Обогащение руд. 2020. № 1. С. 23–29. <https://doi.org/10.17580/or.2020.01.03>.
16. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., D'yachkov F. G. Collecting properties of diisobutyl dithiophosphinate in sulfide minerals flotation from sulfide ore // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. Iss. 5. P. 795–802. <https://doi.org/10.1134/S1062739149050146>.
17. Иванова Т. А., Рязанцева М. В., Зимбовский И. Г. Влияние модификаторов на адсорбционную активность диантимирилметана при флотации сульфидных минералов и кассiterита // Цветные металлы. 2018. № 9. С. 12–18. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.09.01>.
18. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов: теория и практика флотации. М.: Наука, 1993. 205 с.
19. Davari M. R., Movahed S. O. The Flotation by selected depressants as an efficient technique for separation of a mixed acrylonitrile butadiene styrene, polycarbonate and polyoxymethyleneplastics in waste streams // Journal of Polymers and the Environment. 2019. Vol. 27. Iss. 8. P. 1709–1720. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01467-2>.
20. Seng S., Tabelin C. B., Makino Y., Chea M., Phengsaart T., Park I., et al. Improvement of flotation and suppression of pyrite oxidation using phosphate-enhanced galvanic microencapsulation (GME) in a ball mill with steel ball media // Minerals Engineering. 2019. Vol. 143. P. 105931. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105931>.



Information about the authors / Информация об авторах



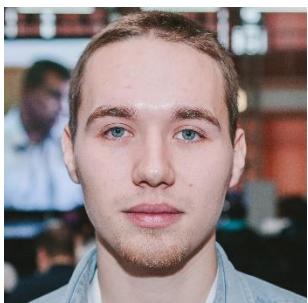
Pavel K. Fedotov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mineral Processing
and Environmental Protection named after S. B. Leonov,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
fedotov@istu.edu.

Федотов Павел Константинович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры обогащения полезных ископаемых
и охраны окружающей среды им. С. Б. Леонова,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
fedotov@istu.edu.



Alexander E. Burdonov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mineral Processing
and Environmental Protection named after S. B. Leonov,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
slimbul@inbox.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5298-445X>.

Бурдонов Александр Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры обогащения полезных ископаемых
и охраны окружающей среды им. С. Б. Леонова,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
slimbul@inbox.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5298-445X>.



Yuriy V. Novikov,
Postgraduate Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
89500505553r@gmail.com.

Новиков Юрий Витальевич,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
89500505553r@gmail.com.



Nikita V. Terentiev,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
mc_krofly@mail.ru.

Терентьев Никита Витальевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
mc_krofly@mail.ru.



Ilya O. Bogdanyuk,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
super_mario99@mail.ru.

Богданюк Илья Олегович,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
super_mario99@mail.ru.

Contribution of the authors / Вклад авторов

Fedotov P. K. defined the problem, developed the concept of the article and performed the critical analysis of literature. Burdonov A. E. described the results and formulated the conclusions of the study. Novikov Yu. V. collected statistical data, presented results in tables and graphs. Terentiev N. V., Bogdanyuk I. O. conducted the experiments.

Федотов П. К. – постановка проблемы, разработка концепции статьи, критический анализ литературы. Бурдонов А.Е. – описание результатов и формирование выводов исследования. Новиков Ю.В. – сбор статистических данных, табличное и графическое представление результатов. Терентьев Н.В., Богданюк И.О. – проведение экспериментов.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 14.03.2022; approved after reviewing 22.04.2022; accepted for publication 25.05.2022.

Статья поступила в редакцию 14.03.2022; одобрена после рецензирования 22.04.2022; принята к публикации 25.05.2022.



HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-172-183>

Forecasting groundwater rise in the historic downtown area of Irkutsk city

Larisa I. Auzina^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of this investigation is to develop an analytical model for predicting the groundwater level rise due to the barrage effect. Processing of a significant volume of production decisions for multiple objects has resulted an analytical model that allows predicting the dynamics of groundwater rise due to the barrage effect when building deep foundation structures. The study has been conducted for the downtown areas of Irkutsk and other cities of Eastern Siberia. Prediction schemes for the groundwater level formation have been made, and an assessment of the study areas by their underflooding conditions has been carried out. Being adequately simple and multi-purpose. The analysis of the research results shows that the hydraulic gradient of the underground water flow and the project structure width have the biggest effect on the groundwater rise. Vertical planning of the territory and the use of pile foundations play a significant role in the formation of the groundwater level. Besides, when evaluating the depth of the underground water formation level and developing the prevention and protection measures, it is necessary to take into account the seasonal rise of the underground waters. The developed model can be applied in the corresponding geological and hydrogeological conditions.

Keywords: groundwater rise, groundwater level, analytical model, prediction, deep foundation

For citation: Auzina L. I. Forecasting groundwater rise in the historic downtown area of Irkutsk city. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(2):172-183. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-172-183>.

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья**УДК 556.3.06**

Прогноз подъема уровня грунтовых вод в районе исторических построек города Иркутска

Лариса Ивановна Аузина^a^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель работы заключалась в разработке аналитической модели для прогноза подъема уровня грунтовых вод в условиях барражного эффекта. В результате обработки значительного объема производственных решений разработана аналитическая модель, позволяющая прогнозировать изменение уровня грунтовых вод, которое происходит при строительстве инженерных сооружений с глубоким заложением фундаментов, создающих эффект подпорной стены (барража). Работа проводилась на участках, расположенных в исторических центрах городов Восточной Сибири, в том числе города Иркутска. Разработаны прогнозные схемы глубин формирования уровня подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов, проведена оценка территории по условиям подтопления в соответствии с существующими нормативными документами. Анализ результатов исследований показывает, что наибольшее влияние на подъем грунтовых вод оказывают гидравлический уклон потока подземных вод и ширина проектного сооружения. Значительную роль в формировании нового подпорного горизонта в пределах исследуемой территории играют вертикальная планировка застраиваемой территории и использование свайных фундаментов. Кроме того, при разработке профилактических и защитных мероприятий необходимо учитывать многолетние сезонные колебания уровня грунтовых вод. Представленная аналитическая модель достаточно проста, универсальна и может применяться в различных геологического-гидрогеологических условиях.

Ключевые слова: подпор, уровень грунтовых вод, аналитическая модель, прогноз, перезаглубленный фундамент



Для цитирования: Аузина Л. И. Прогноз подъема уровня грунтовых вод в районе исторических построек города Иркутска // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 172-183. (In Engl.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-172-183>.

Introduction

Underflooding caused by different reasons is observed in many cities all over the world, including the USA, Great Britain, France, Germany, India, Kazakhstan, China, Korea, etc. [1–11]. In Russia, underflooding takes place in many built-up areas of the European part of the country, the Urals, the Far East, and Siberia [12, 13].

The built-up areas in the south of Eastern Siberia are extremely subject to underflooding. The reasons are diverse: disastrous snowmelt floods, leaks from the old underground utilities, failures of the storm sewage systems, and a barrage effect of the deep foundations of civil engineering structures with underground parking lots [11, 14].

In 2002, The State Duma of the Russian Federation passed the law “On the cultural heritage objects of the peoples of Russia” that had an emphasis on the citizens’ constitutional obligation to preserve the national historical and cultural heritage. However, in the period 2000–2010, over 2,500 historical and cultural monuments were destroyed in Russia. The state of half of the monuments protected by the government is unsatisfactory, and most of them need urgent protection measures. According to the data from the Ministry of Culture, almost 65 % of the cultural-and-historical heritage objects are either in an emergency or pre-emergency condition¹. Most of the buildings that are over 100 years old are subject to the negative influence of the ecological factors, including underflooding. The historical cities, especially their downtown areas, require reconstruction projects with an indication of the boundaries of the protected zones. This could make it possible to eliminate a number of the city-planning problems connected with parceling out for new construction in the historic downtown areas. Besides, when building deep foundation structures, it is necessary to take into account the risk of the underflooding of the historical buildings.

Research objective

The research aims to develop an operational forecasting procedure for the changes in the groundwater hydrodynamic regime due to the barrage effect of deep foundation structures to facilitate engineering decision-making on the initial stages of architectural construction projects.

Research methods and procedures

The construction of deep foundation buildings in areas with a small depth of the groundwater level causes a “barrage” effect increasing the risk of the underflooding of the adjacent built-up plots.

The barrage effect is groundwater rise before the dam and its descent after the dam due to the damming of the groundwater filtration flow. Depending on the hydrogeological characteristics of the dammed water-bearing layer and the size of the engineering structure, the level of the groundwater rise varies from a few centimeters to a few meters, causing the ground body deformation, underflooding of the area and nearby structures, and other adverse consequences.

As it was mentioned above, the underflooding due to the barrage effect is common in the modern urban areas. The construction that takes place not only in the urban fringe but also in the historical and cultural zones causes damage to the foundations of the old structures and often leads to the destruction of the historical buildings.

The study focuses on the main causes of the changes in the urban hydrogeological conditions and on the factors determining their hydrodynamic regime [15].

The changes in the hydrogeological conditions of the urban territories located in the Angara River Valley are determined by natural and technogenic factors.

¹ The 3^d parliamentary forum “Historical and cultural heritage of Russia”. *The Union of the towns of the Russian Federation*. Available from: <http://smgrf.ru/3-parlamentskij-forum-istoriko-kul-turnoe-nasledie-rossii/> [Accessed 09th March 2022]. (In Russ.).



The natural factors are seasonal fluctuations in the atmospheric precipitation. The technogenic factors include the emergency evacuation of water from the Angara cascade reservoirs and the barrage due to the construction and maintenance of deep foundation structures.

The regime-forming factors are divided into regional and local ones.

The regional factors include groundwater rise connected with the filtration of water from the canals, rivers, and other water pools, as well as with the leaks from the underground industrial utilities, large intercepting sewers, etc.

The local factors include the groundwater rise caused by the barrage effect of the underground structures and infiltration of the leaks from the water carrying utilities, as well as the cones of depression due to different types of drainage in the facilities under construction and maintenance.

The present paper focuses on the local technogenic factor associated with the construction of modern buildings with underground shopping centers and parking lots, and other objects with deep foundations that cause groundwater rise due to the barrage effect.

The situation concerning groundwater rise in Irkutsk, Cheremkhovo, Usolje-Sibirskoye, and other cities of Eastern Siberia is complicated. For example, a large part of the downtown area of Irkutsk is represented by the buildings of the late 18th – early 19th centuries, the groundwater level is 1.2–5 m from the earth's surface [12]. A minor part of the unbuilt areas is allotted for the construction of large shopping centers or apartment houses with deep foundations and underground parking lots, which is followed by the reformation of the groundwater filtration flow structure.

The study area is located in a transition zone between the platform flatland and the Baikal mountainous region. The relief of the territory is moderately rugged due to the river valleys and creek valleys of the first and second orders. The main rivers are the Angara River and its tributaries Irkut, Olkha, Ushakovka, etc. The watershed spaces have flat and rounded tops with an absolute elevation 480–520 m and the maximal ruggedness depth 160 m.

In hydrogeological terms, the above areas are associated with the Irkutsk basin, the largest structure of the Angara-Lena artesian basin of the first order.

The major water-bearing sediments are Quarterly (gravel-shingle, sand-clay), Jurassic (sandstone, argillite, and siltstone), and Cambrian sediments (dolomite, saliferous rocks). The sediments have a block structure inherited from the crystalline basement. The position of the rock blocks within the study areas determines the major geomorphological structures. In combination with the joint fissures and erosion network, it has a crucial influence on the engineering-hydrogeological conditions [16–18].

The type section of the central territory of Irkutsk is a two-layer structure: the upper part is represented with loose Quarterly sediments, and the lower one, with Jurassic rock formations. The Quarterly gravel-shingle and sandy-sabulous sediments of the upper part significantly differ by their structure and hydraulic conductivity. The sediments nearest to the surface are sandy-sabulous with the hydraulic conductivity K less than 5–6 m/day. It is the stratum where the groundwater table is formed. The gravel-shingle sediments have much higher hydraulic conductivity, 100–300 m/day. The groundwater level of the Quarterly aquifer is at a depth of 1.2–5 m. The layer's underlying formation is represented by Jurassic sandstone, siltstone, and carbonaceous shale, the filtration in the disturbed zones being 100 m/day (while the average value is 0.5–1.5 m/day). The aquifer of the Upper Quarterly sediments is shut off by the technogenic ground with an average thickness of 1.5 m [11, 13, 16].

The modeling of such situations for several cities of the Irkutsk region, along with the forecast of the groundwater rise in the adjacent territories has been conducted a few times [11–13, 16]. Based on this, an empirical relationship has been elicited.

The article presents the procedure and methods of the work, using the cases of the sites that were chosen due to their geological structure and hydrogeological conditions typical of the study territory (Fig. 1).

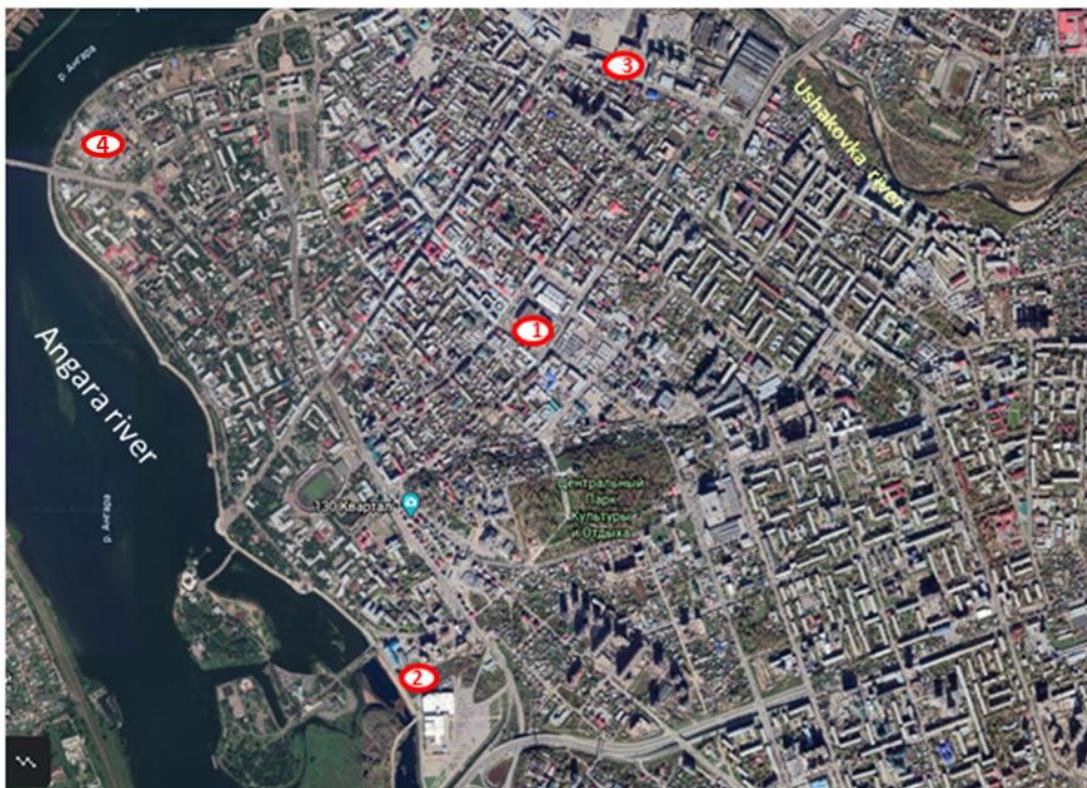


Fig. 1. Location of key (standard) sites no. 1, 2, 3, 4 in Irkutsk
Рис. 1. Расположение ключевых (типовых) участков № 1, 2, 3, 4, г. Иркутск

Site 1 is situated in the central zone of the historic housing estate area of Irkutsk. It was planned for the construction of a 5–10-storeyed building with a three-level underground parking lot and a foundation depth of 8–12 m. Based on the initial data analysis [10–13, 16, 17, 19], a database that included 13 attribute characteristics by 96 points, was created.

As a result of the natural conditions schematization that was conducted following the existing Russian standards² and the appendix recommendations³, a hydrogeological model was developed.

The vertical structure of the watered stratum of the terrace alluvial sediments is assumed two-layered. The upper part of the section consists of dense loam and clay sand with thin sand interbeds with a total average thickness of 2.45 m and $K = 1\text{--}5 \text{ m/day}$. The middle and lower parts of the section consist of Upper Quarterly

gravel-shingle sediments 2 to 5.1 m thick, which are the main collectors of the groundwater and have a homogenous isotropic structure with $K = 84.5 \text{ m/day}$. The re-formation of the groundwater level takes place in the loam and clay sand sediments of the upper part of the section.

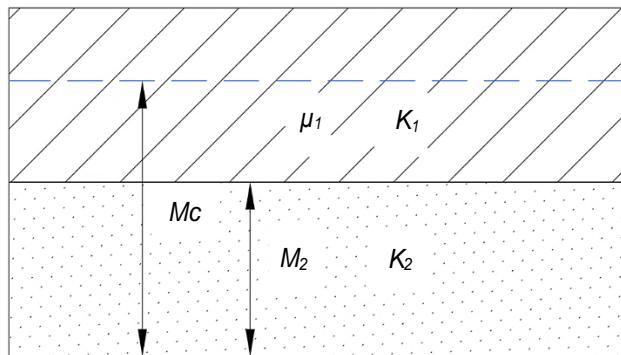
The gravel-shingle sediments almost all over the territory have much less penetrable underlying eluvial Jurassic sediments with K being 0.5–1.5 m/day.

The hydraulic regime of the alluvial aquifer ground water is unconfined. The insignificant groundwater pressure (0.05–0.4 m) in certain wells drilled on the site in the period 1966–2008 is most probably connected with the influence of the pressure water of the Jurassic aquifer and the local waterproof rock lenses in the Upper Quarterly sediments.

The hydrodynamic model of the territory is represented in Fig. 2.

² Building codes 104.13330.2016. Engineering protection of territories from flooding and underflooding. Updated edition of the Building codes and regulations 2.06.15-85. Consortium code. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/456054204> [Accessed 09th March 2022]. (In Russ.).

³ Underflooding prediction and drainage systems calculation for developed or built-over territories. Reference book for the Building codes and regulations 2.06.15-85. Codes and standards library. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data1/2/2697/> [Accessed 09th March 2022]. (In Russ.).

**Fig. 2. Hydrodynamical model of a site:**

M_c – groundwater flow rate (average value is 5.02 m); μ_1 – water yield of the upper layer (0.92);
 K_1 – hydraulic conductivity of the upper layer (1–5 m/day); K_2 – hydraulic conductivity of the lower layer (84.5 m/day); M_2 – average flow rate of the lower layer (4.07 m)

The generalized hydrodynamical model uses averaged parameter values

Рис. 2. Гидродинамическая модель участка исследований:

M_c – мощность потока грунтовых вод (среднее значение – 5,02 м); μ_1 – коэффициент водоносимости верхнего слоя (0,92); K_1 – коэффициент фильтрации верхнего слоя (1–5 м/сут.); K_2 – коэффициент фильтрации нижнего слоя (84,5 м/сут.); M_2 – средняя мощность нижнего слоя (4,07 м)

В обобщенной гидродинамической модели использованы осредненные значения параметров

The groundwater table incline varies depending on the position of the main drain (in this case, the Angara River) and a few dome-shaped structures formed in the area due to the underground facilities leakage. The direction of the main flow is southeast to northwest, the flow incline increasing from 0.016 to 0.027.

The bed is modeled as an unlimited calculation scheme. The infiltration is assumed homogeneous all over the area, and its effect on the groundwater level change Δh is not taken into account on this stage of modeling as it does not influence the character of the groundwater stationary rise in the homogenous strata [20, 21]. In this case, the problem is considered stationary and determinate, i.e. within the defined stages of the groundwater rise formation, the main elements of the groundwater flow stay constant. The prediction of the stationary process consists of plotting the depression curves on the concluding stage of the time interval meeting the boundary conditions⁴ [22].

The distribution of the levels in the one-dimensional homogenous isotropic stratum when solving the stationary problem not taking into account the infiltration feed is described with the Laplace's equation modification [20, 21]:

$$\frac{\partial^2(\Delta h^2/2)}{\partial x^2} = 0. \quad (1)$$

Here, Δh is groundwater rise in section x .

In the first stage, a 'nowcast' model is built, i.e. a model for the existing conditions; on the second stage, a 'forecast' model is built, i.e. a model for the conditions caused by groundwater rise [13, 23].

The analysis of the nowcast model with the use of the software complex Surfer 10 has made it possible to represent a general picture of the existing hydrodynamic conditions, specify the direction of the flow, and define the hydraulic incline of the underground water table on different sites, as well as the average depth of the groundwater level (which in this case is 2.5 m).

The predictive modeling has shown that the maximal rise of the groundwater level on the study site is 0.5 m, and the minimum depth of the groundwater level after the construction has been completed is 1.7 m (Fig. 3). Thus, by the existing Russian standard-setting documents (Building Codes 104.13330.2016), the territory is, in the main, classified as moderately underflooded. The general direction of the underground water flow movement has not changed, and the local re-formation of the groundwater level has taken place around the project structure (which is connected with the formation of the groundwater rise) and has covered a significant part of the historic area (Fig. 4).

⁴ Gavich I. K. *Hydrogeodynamics*. Moscow: Nedra; 1988. 349 p. (In Russ.).

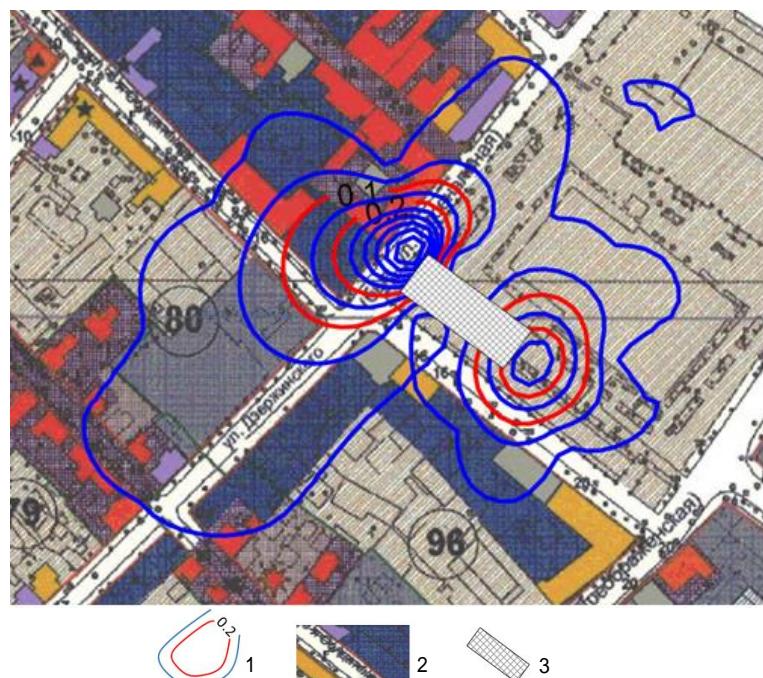


Fig. 3. Isolines of the groundwater level rise Δh [24]:

1 – isolines of the groundwater level rise due to the groundwater logging (iteration is 0.05 m);

2 – underlay with the location diagram of historical and cultural heritage sites; 3 – designed structure

Рис. 3. Изолинии величины подъема уровня грунтовых вод Δh [24]:

1 – изолинии величины подъема уровня грунтовых вод в результате подпора (шаг – 0,05 м); 2 – подложка со схемой расположения объектов историко-культурного наследия; 3 – проектируемое сооружение

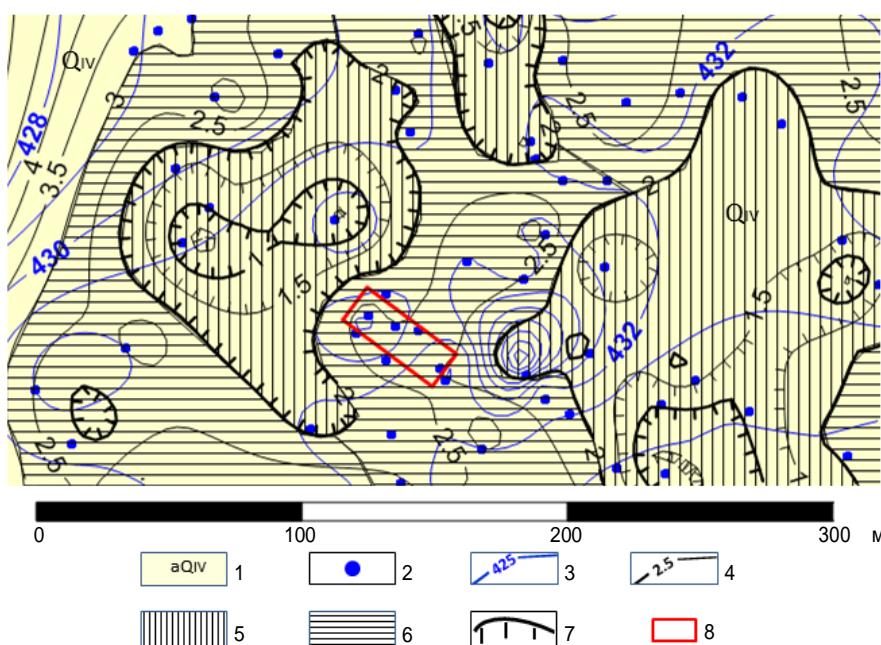


Fig. 4. Zoning diagram of the site no. 1 by the underflooding degree [24]:

1 – quartary alluvial sediments; 2 – mine workings (wells, manholes, pits); 3 – elevation mark of the underground water level after the groundwater rise (construction), m; 4 – formation depth of the underground water level after the groundwater rise (construction), m; 5 – moderately underflooded territory; 6 – weakly underflooded territory;

7 – boundary of the moderately underflooded territory; 8 – project structure

Рис. 4. Схема районирования территории участка № 1 по степени подтопления [24]:

1 – аллювиальные отложения четвертичного возраста; 2 – горные выработки (скважины, колодцы, подвалы);
3 – абсолютная отметка уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м;
4 – глубина формирования уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м;
5 – умеренно подтопленная территория; 6 – слабо подтопленная территория;
7 – граница умеренно подтопленной территории; 8 – проектное сооружение

The described algorithm was applied for other similar study sites classified as underflooded with different percentages of strongly, moderately, and weakly underflooded subzones.

Site 2 is located in the central part of Irkutsk, in the Angara riverbed area. It is intended for the construction of a residential complex with a foundation depth of over 6 m. The underground part of the structure is going to be used as a parking lot. The pile foundation partially blocks the groundwater stream both by area and in section. The project specifies vertical planning of the territory with landfilling of over two meters thick. The use of pile foundations together with vertical planning makes it possible to avoid aerial underflooded of the territory despite the groundwater rise to 0.3 m (Fig. 5).

Site 3 is also located in the center of Irkutsk, in the Ushakovka riverbed part. The depth of the strip foundation of the planned administrative and business center is 4.5 m, with no vertical planning included. Thus, with the underground

water rise to 0.2 m only, a big part of the territory is going to be underflooded (Fig. 6).

Site 4 is located on the right bank of the Angara River. The depth of the foundation of the planned administrative building is 2.5 m without taking into account the vertical layout. After the predicted groundwater rise by 0.8 m, part of the territory will be flooded (Fig. 7). The obtained results show that the territory planned with technogenic ground landfilling and a pile foundation has minimal underflooded risk.

Research results and analysis

As a result of the study aiming to forecast the change of the hydrogeological conditions, the main causes of the process of change and regime-forming factors have been distinguished.

The present paper gives a detailed consideration of the prediction of the local technogenic factor connected with the construction of structures with deep foundations causing the groundwater rise due to the barrage effect.

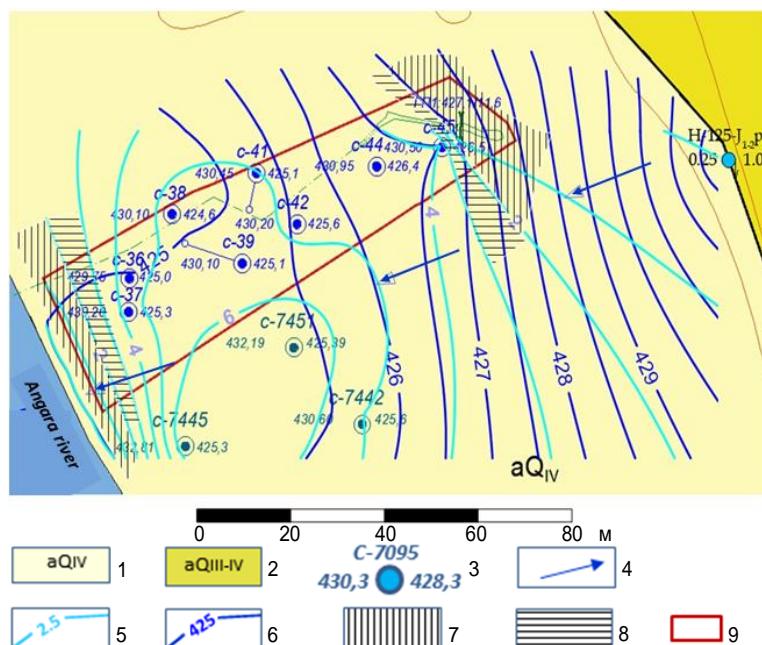


Fig. 5. Zoning diagram of the site no. 2 by the underflooding degree [24]:

- 1, 2 – quaternary alluvial sediments; 3 – well: at the top – number, on the left – elevation mark of the earth surface, m, on the right – elevation mark of the underground water level, m; 4 – underground water flow direction;
- 5 – formation depth of the underground water level after the groundwater rise (construction), m; 6 – elevation mark of the underground water level after the groundwater rise (construction), m; 7 – moderately underflooded territory;
- 8 – weakly underflooded territory; 9 – project structure

Рис. 5. Схема районирования территории участка № 2 по степени подтопления [24]:

- 1, 2 – аллювиальные отложения четвертичного возраста; 3 – скважина: вверху – номер, слева – абсолютная отметка поверхности земли, м, справа – абсолютная отметка уровня подземных вод, м; 4 – направление движения потока подземных вод; 5 – глубина формирования уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м; 6 – абсолютная отметка уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м; 7 – умеренно подтопленная территория;
- 8 – слабо подтопленная территория; 9 – проектное сооружение

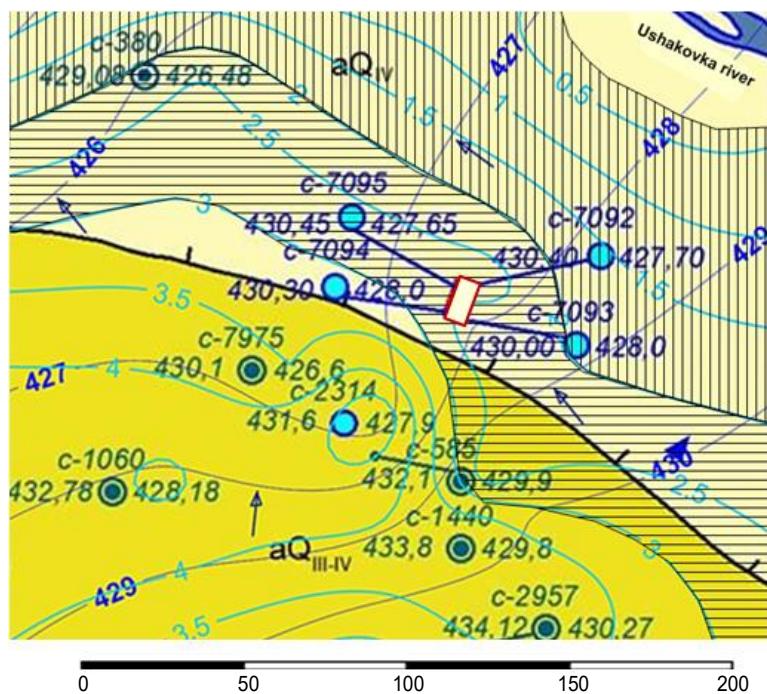


Fig. 6. Zoning diagram of the site no. 3 by the underflooding degree [24]
See the legend of Fig. 5

Рис. 6. Схема районирования территории участка № 3 по степени подтопления [24]
Условные обозначения см. на рис. 5

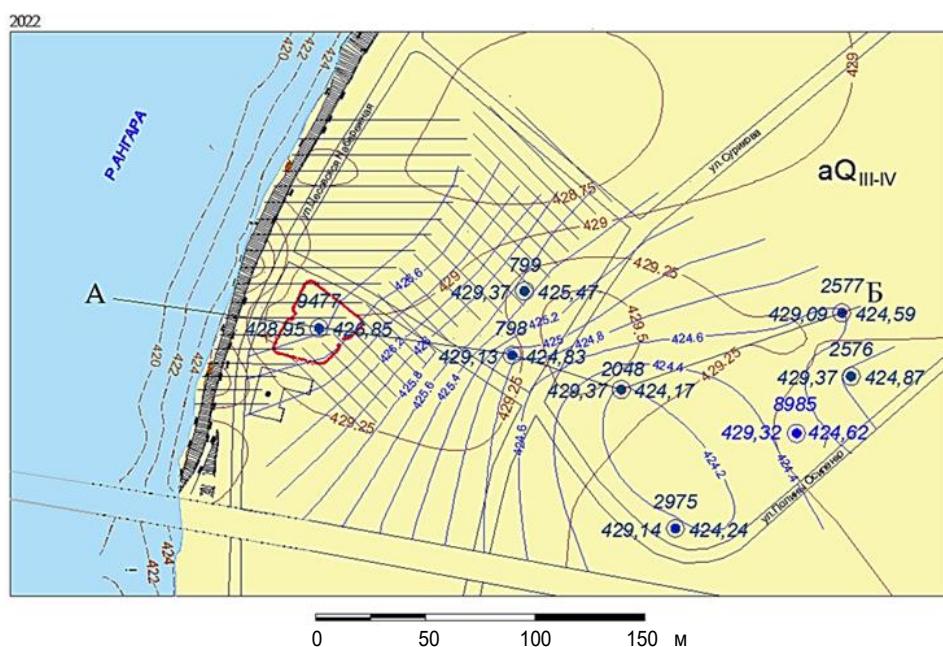


Fig. 7. Zoning diagram of the site no. 4 by the underflooding degree
See the legend of Fig. 5

Рис. 7. Схема районирования территории участка № 4 по степени подтопления
Условные обозначения см. на рис. 5

The modeling of the groundwater rise formation for several sites of Irkutsk and other cities of the Irkutsk region, as well as the results of the analytical solution of the Laplace' equation for the taken calculation scheme (Fig. 2), including the solution of the equation system in partial

derivatives of a parabolic type with the given initial and boundary conditions, have shown that the hydraulic decline of the flow and the width of the project structure has the biggest effect on the groundwater rise. The conclusions allow setting up and using the following analytical solu-



tion to evaluate the upsurge of the groundwater level Δh [24]:

$$\Delta h = \frac{I \cdot B}{1,78} \quad (2)$$

Here, I is the underground water table incline; B is the width of the retaining wall (barrage), m; 1.78 is the coefficient obtained analytically.

The gradient values taken for the calculations correspond to the real values existing in the ground flow of the upper aquifer in the study territories. The calculated values of the structure width are 15, 25, 50, 80, 110, 170, and 200 m (Fig. 8), which well corresponds to the size of the currently designed buildings with the foundation depth up to 8 m.

It is necessary to mention the constraints on the use of the given formula:

- Provisionally homogenous water-bearing layer;
- Perpendicularity of the building and flow;
- Complete ‘cut-in’ of the foundation (when the underground part of the foundation completely blocks the underground water flow);
- Constancy or absence of the infiltration.

The calculation of the groundwater rise due to the incomplete cut-in of the project structures can be realized by recalculating the empirical coefficient 1.78 in Eq (2) as a percentage of the foundation cut-in depth as it was done for the objects 2, 3 and 4.

Discussion

The groundwater level surface is a highly dynamic index. For example, in the period 1984–1997, the average annual level by the data from several observation wells in the central part of Irkutsk changed by 0.8–1 m. Thus, when developing technological schemes, it is necessary to take into account that the predicted level of underground water can reach 0.9–1.4 m from the earth's surface. In this case, the major part of the territory is classified as moderately underflooded [12]. The prediction is especially important for the downtown areas because the underflooding affects not only the modern buildings but also the architectural monuments most of which, being the national endow objects, are in an emergency condition because of the fast-developing deformations of the underground elements. Hydro isolation daub that is currently used to protect the foundations of historical buildings from the destructive effect of the underground water is not effective. The more appropriate prevention measures include engineering preparation of the territories and the use of protection drainage systems that are common in construction and maintenance processes. The above also includes vertical planning, i.e. artificial increase of the planned elevation marks of the developed territory, hydraulicking, wall drainage, etc. [23, 25, 26].

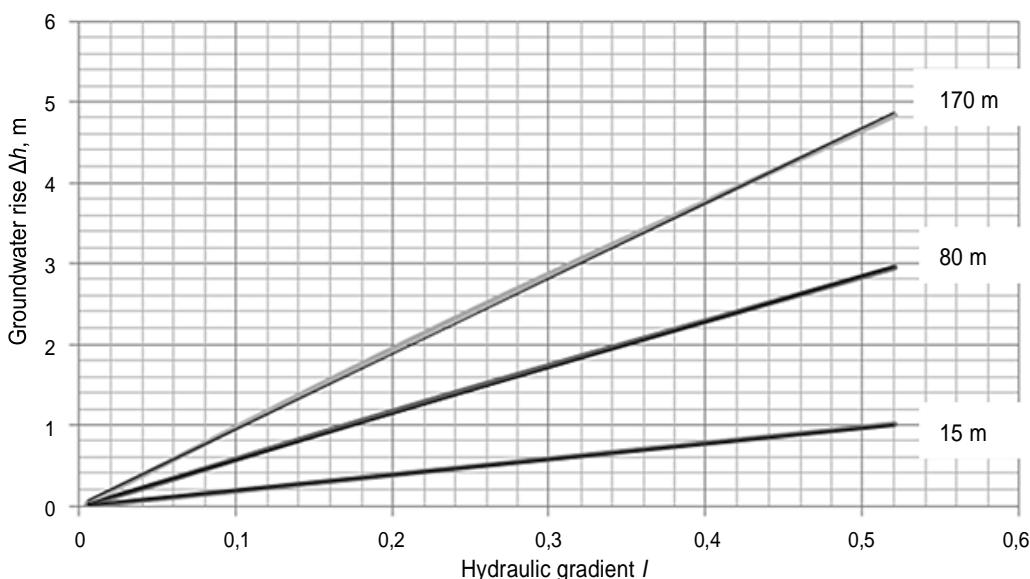


Fig. 8. Groundwater rise value Δh for the different values of the groundwater table incline I (hydraulic gradient) and the building width B

Рис. 8. Величина подпора подземных вод Δh при различных значениях гидравлического уклона I и ширине здания B



The above aspects predetermine the necessity of timely and correct prediction of the groundwater level change for the construction and further engineering preparation of the city territory, as well as for the development of effective protection measures. The realization of this extremely urgent and important task is necessary for the preservation of the historical and cultural heritage of the old Siberian cities.

Conclusion

The analysis of the research results shows that the hydraulic gradient l of the underground water flow and the project structure width B have the biggest effect on the groundwater rise.

The equation solutions for multiple objects have made it possible to develop an analytical model for the prediction of the groundwater rise. The model is quite multi-purpose and can be used for the groundwater rise forecasts in many historical urban areas with similar geological and hydrogeological conditions.

Vertical planning of the territory and the use of pile foundations play a significant role in the formation of the groundwater level. Besides, when evaluating the depth of the underground water formation level and developing the prevention and protection measures, it is necessary to take into account the seasonal rise of the underground waters.

References

1. Davies J. A. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation. *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1987;1:139-144.
2. Abu-Rizaiza O. S., Sarikaya H. Z., Ali Khan M. Z. Urban groundwater rise control: case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1989;115(4):588-607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(588)).
3. Whitaker D. Groundwater control for the Stratford CTRL station box. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering*. 2004;157(4):183-191. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.183>.
4. Preene M., Loots E. Optimisation of dewatering systems. *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015: 2841-2846.
5. Preene M., Roberts T. O. L. Groundwater control for construction in the Lambeth Group. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering*. 2002;155(4):221-227. <https://doi.org/10.1680/geng.2002.155.4.221>.
6. Davis G. M., Horswill P. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England. *Engineering Geology*. 2002;66 (1-2):1-18.
7. Long M., Murphy M., Roberts T. O. L., O'Brien J., Clancy N. Deep excavations in water-bearing gravels in Cork. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2015;48(2):79-93.
8. Preene M., Fisher S. Impacts from groundwater control in urban areas. *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015:2847-2852.
9. Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E., Nikitenkov A., Nazarov A. Degree of areal drainage assessment using digital elevation models. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2014;21:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/21/1/012018>.
10. Shen'kman B. M., Sholokhov P. A., Shen'kman I. B. Underflooding of Irkutsk with groundwaters. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2011;2:54-62. (In Russ.).
11. Lonshakov G. S., Auzina L. I. Evaluation of determining factors of underground hydrosphere evolution within urban areas (on the example of Irkutsk). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(11):50-59. (In Russ.).
12. Lonshakov G. S., Auzina L. I. Method of integral geoecological evaluation of the underground hydrosphere sustainability within the territory of Irkutsk city. In: *Environmental and engineering aspects for sustainable living: International symposium*. Hannover: EWG e.V; 2017, p. 18–20.
13. Auzina L. I. Engineering geology and hydrogeology in an urban environment of East Siberia, Russia. In: *8th International IAEG congress*. Rotterdam: Balkema; 2000, vol. 6, p. 4521–4525.
14. Kuranov N. P., Muftakhov A. Zh. *Underflooding areas of big cities: a review*. Moscow: Moscow Urban Territorial Center for Scientific and Technical Information and Propaganda; 1986. 27 p. (In Russ.).
15. Auzina L. I., Parshin A. V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33:012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>.
16. Auzina L. I., Serova G. E. Effect of technogenic underflooding on stability of soil foundations and structures in Irkutsk. In: *Gorod: proshloe, nastoyashchее, budushchее = City: past, present, future*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 124–128. (In Russ.).
17. Klamer M., Druzhinina I. E., Glebova N. M. Arrangement peculiarities of Ushakovka river in Irkutsk and its natural potential. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2017;7(2):117-125. (In Russ.).



18. Lobatskaya R. M., Strelchenko I. P. Gis-based analysis of fault patterns in urban areas (a case study of Irkutsk city). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2014;11:76-88. (In Russ.).
19. Bolshakov A., Surodina A., Maksimova E. The landscape congruity principle in urban planning. *Proekt Baikal.* 2016;49:54-59. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.49.1050>.
20. Gavich I. K., Zektser I. S., Kovalevskii V. S., Yazvin L. S., Pinneker E. V., Bondarenko S. S., et al. *Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics.* Novosibirsk: Nauka; 1984. 242 p. (In Russ.).
21. Lukner L., Shestakov V. M. *Geofiltration modeling.* Moscow: Nedra; 1976. 408 p. (In Russ.).
22. Lomize G. M. *Filtration in fractured rocks.* Moscow: Gosenergoizdat; 1951. 127 p. (In Russ.).
23. Abramov S. K., Degtyarev B. M., Dzektser E. S., et al. *Prediction and prevention of groundwater logging in construction.* Moscow: Stroizdat; 1978. 177 p. (In Russ.).
24. Auzina L. I. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(1):73-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>.
25. Belov A. A., Kiryushin A. V., Maskaykin V. N. Engineering preparation of urban area under flooding. *Nauchnoe obozrenie.* 2017;1. Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_28840909_78018777.pdf [Accessed 09th March 2022]. (In Russ.).
26. Sologaev V. I. *Filtration calculations and computer modeling for groundwater logging protection in urban construction.* Omsk: Siberian State Automobile and Highway University; 2002. 416 p. (In Russ.).

Список источников

1. Davies J. A. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation // *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1987. Vol. 1. P. 139–144.
2. Abu-Rizaiza O. S., Sarikaya H. Z., Ali Khan M. Z. Urban groundwater rise control: case study // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 1989. Vol. 115. Iss. 4. P. 588–607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(588)).
3. Whitaker D. Groundwater control for the Stratford CTRL station box // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering.* 2004. Vol. 157. Iss. 4. P. 183–191. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.183>.
4. Preene M., Loots E. Optimisation of dewatering systems // *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development.* 2015. P. 2841–2846.
5. Preene M., Roberts T. O. L. Groundwater control for construction in the Lambeth Group // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering.* 2002. Vol. 155. Iss. 4. P. 221–227. <https://doi.org/10.1680/geng.2002.155.4.221>.
6. Davis G. M., Horswill P. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England // *Engineering Geology.* 2002. Vol. 66. Iss. 1-2. P. 1–18.
7. Long M., Murphy M., Roberts T. O. L., O'Brien J., Clancy N. Deep excavations in water-bearing gravels in Cork // *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology.* 2015. Vol. 48. Iss. 2. P. 79–93.
8. Preene M., Fisher S. Impacts from groundwater control in urban areas // *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development.* 2015. P. 2847–2852.
9. Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E., Nikitenkov A., Nazarov A. Degree of areal drainage assessment using digital elevation models // *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science.* 2014. Vol. 21. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/21/1/012018>.
10. Шенькман Б. М., Шолохов П. А., Шенькман И. Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 54–62.
11. Лоншаков Г. С., Аузина Л. И. Оценка ведущих факторов эволюции подземной гидросферы урбанизированных территорий (на примере г. Иркутска) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 11. С. 50–59.
12. Lonshakov G. S., Auzina L. I. Method of integral geoecological evaluation of the underground hydrosphere sustainability within the territory of Irkutsk city // Environmental and engineering aspects for sustainable living: International symposium. Hannover: EWG e.V., 2017. P. 18–20.
13. Auzina L. I. Engineering geology and hydrogeology in an urban environment of East Siberia, Russia // 8th International IAEG congress. Rotterdam: Balkema, 2000. Vol. 6. P. 4521–4525.
14. Куранов Н. П., Муфтахов А. Ж. Проблема подтопления грунтовыми водами территории больших городов: обзорная информация. М.: Изд-во МГЦНТИ, 1986. 27 с.
15. Auzina L. I., Parshin A. V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>.
16. Аузина Л. И., Серова Г. Е. Влияние техногенного подтопления на устойчивость грунтовых оснований и сооружений г. Иркутска // Город: прошлое, настоящее, будущее. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 124–128.
17. Кламер М., Дружинина И. Е., Глебова Н. М. Особенности расположения реки Ушаковки в Иркутске и ее природный потенциал // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 2. С. 117–125.
18. Лобацкая Р. М., Стрельченко И. П. Информационные технологии в оценке разломно-блоковых структур урбанизированных территорий (на примере



- г. Иркутска) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11. С. 76–88.
19. Большаков А., Суродина А., Максимова Э. Принцип ландшафтосообразности в градостроительном планировании // Проект Байкал. 2016. № 49. С. 54–59. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.49.1050>.
20. Гавич И. К., Зекцер И. С., Ковалевский В. С., Язвин Л. С., Пиннекер Е. В., Бондаренко С. С. [и др.]. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1984. 242 с.
21. Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1976. 408 с.
22. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. М.: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.
23. Абрамов С. К., Дегтярев Б. М., Дзекцер Е. С. [и др.]. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве. М.: Стройиздат, 1978. 177 с.
24. Аузина Л. И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири. Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 1. С. 73–84. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>.
25. Белов А. А., Кирюшин А. В., Маскайкин В. Н. Инженерная подготовка городской территории при подтоплении // Научное обозрение. 2017. № 1. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_28840909_78018777.pdf (09.03.2022).
26. Сологаев В. И. Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. 416 с.

Information about the author / Информация об авторе



Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics, and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
lauzina@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>.

Аузина Лариса Ивановна,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
lauzina@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>.

Contribution of the author / Вклад автора

The author developed the concept of the article, prepared the text of the article, agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Автор разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The author declares no conflict of interests.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

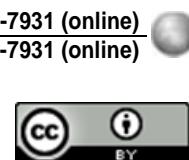
The final manuscript has been read and approved by the author.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 04.03.2022; approved after reviewing 08.04.2022; accepted for publication 11.05.2022.

Статья поступила в редакцию 04.03.2022; одобрена после рецензирования 08.04.2022; принята к публикации 11.05.2022.

**Научная статья****УДК 553.048**<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-184-196>

Доразведка Верхнечонского месторождения технических подземных вод: новые методы изучения и результаты

Егор Олегович Теняков^a, Евгений Александрович Савельев^b,**Мария Александровна Данилова^c**^{a,b}ООО «Тюменский нефтяной научный центр», г. Тюмень, Россия^cАО «Верхнечонскнефтегаз», г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Теняков Егор Олегович, eotenyakov@tnnc.rosneft.ru

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в уточнении геологической модели Верхнечонского месторождения технических подземных вод (Восточная Сибирь, Россия), переоценке запасов по промышленной категории, формировании геофiltрационной модели. В статье освещены основные подходы, использованные при проведении полевых и камеральных исследований, представлен опыт организации масштабных опытно-фильтрационных работ в условиях ограниченного времени и персонала на крупном функционирующем месторождении. В основу работы положены результаты многолетних режимных наблюдений, полевых опытно-фильтрационных работ 2019–2020 гг., информация геологической базы данных по водозаборному и нефтяному фонду скважин месторождения, в том числе комплекс скважинных исследований, а также сведения о геологическом и гидрогеологическом строении района из архивных и опубликованных источников. Для создания геофильтрационной модели использовано программное обеспечение Visual ModFlow Flex. Результатом проведения и интерпретации работ стало обоснование природной гидрогеологической модели, отличной от принятой ранее. Так, доказана связь двух водоносных комплексов – верхолен-илгинского комплекса верхне-среднекембрийского возраста и литвинцевского комплекса нижне-среднекембрийского возраста. В результате работ в Visual ModFlow Flex создана геофильтрационная модель, хорошо согласованная с фактическими данными и позволившая выявить непроницаемые барьеры, а также спрогнозировать геомиграцию сероводорода. Запасы подземных вод месторождения впервые поставлены на государственный баланс в полном объеме по промышленной категории В, переоценка выполнена по трем участкам месторождения, откорректированы нагрузки на скважины для оптимальной работы водозаборов. По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что использование геофильтрационной модели оправдано на месторождениях сложного геологического строения и данная модель может использоваться как постоянно действующая для контроля и корректировки режима разработки. Опыт организации работ на крупном действующем нефтяном месторождении также может быть полезен при переоценке запасов на месторождениях-аналогах.

Ключевые слова: переоценка запасов, геофильтрационная модель, технические воды, Верхнечонское месторождение

Для цитирования: Теняков Е. О., Савельев Е. А., Данилова М. А. Доразведка Верхнечонского месторождения технических подземных вод: новые методы изучения и результаты // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 184–196. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-184-196>.

Original article

Further exploration of the Verkhnechonskoye field of technical groundwater: new research methods and results

Egor O. Tenyakov^a, Evgeny A. Saveliev^b, Maria A. Danilova^c^{a,b}Tyumen Oil Research Center LLC^cVerkhnechonskneftegaz LLC

Corresponding author: Egor O. Tenyakov, eotenyakov@tnnc.rosneft.ru

Abstract. The purpose of the research is to refine a geological model of the Verkhnechonsk field of technical groundwater (Eastern Siberia, Russia), reassess groundwater reserves by the industrial category and form a geofiltration model. The article deals with the main approaches used in conducting of field and desk researches. It also introduces the organization

© Теняков Е. О., Савельев Е. А., Данилова М. А., 2022



experience of large-scale pilot filtration work under time- and personnel-limited conditions at a large operating field. The work is based on the results of long-term regime observations, field experimental and filtration works carried out in 2019–2020. It uses the information of a geological database on the water and oil intake facility of wells, including a complex of borehole studies, as well as the data on the geological and hydrogeological structure of the field according to archival and published sources. Visual ModFlow Flex software was used to create a geofiltration model. Having conducted and interpreted the works, the justification of a natural hydrogeological model different from the one adopted earlier was performed. Thus, the relationship of two water-bearing complexes – the Verkholensky-Ilginsky complex of the Upper-Middle Cambrian age and the Litvintsevsky complex of the Lower-Middle Cambrian age was proved. The works in the Visual ModFlow Flex resulted in the creation of a geofiltration model, which correlates well with the actual data, allows to identify impenetrable barriers, as well as predicts the geomigration of hydrogen sulfide. It is the first time that the underground water reserves of the field were included in the State balance sheet in full-scale according to the industrial category B. The reassessment was performed for three sites of the field, well loads were adjusted for optimal operation of water intakes. The obtained results of the conducted research imply that the use of geofiltration model is reasonable in the fields of complex geological structure and this model can be used on a permanent basis for monitoring and adjusting of the development mode. The organization experience of works at a large operating oil field can also be useful under the reserve reassessment at analogous fields.

Keywords: reassessment of reserves, geofiltration model, technical water, Verkhnechonskoye field

For citation: Tenyakov E. O., Saveliev E. A., Danilova M. A. Further exploration of the Verkhnechonskoye field of technical groundwater: new research methods and results. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(2):184-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-184-196>.

Введение

Верхнечонское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) расположено в Катангском районе Иркутской области. Недропользователем является АО «Верхнечонскнефтегаз», входящее в структуру ПАО НК «Роснефть». Месторождение открыто в 1978 г., введено в разработку в 2008 г., с 2009 г. началось формирование системы поддержания пластового давления. Всего за период 2007–2020 гг. выполнено 13 отчетов с оценкой запасов подземных вод по различным категориям по различным участкам. Переоценка запасов месторождения в целом по всем участкам выполняется впервые.

В настоящее время для обеспечения водой системы поддержания пластового давления на Верхнечонском НГКМ функционирует 64 скважины, расположенные на трех участках – Восточно-Бираинском, Дагалдынском и Ирактаконском (рис. 1), суммарная добыча по которым достигала в отдельные годы до 31 тыс. м³/сут. Дебиты скважин варьируют от 50 до 990 м³/сут. Часть запасов подземных вод (66 %) оценена по категории В, при этом в целом запасы распределены на месторождении неравномерно: 60 % запасов сосредоточено на Восточно-Бираинском участке, 27 % – на Дагалдынском, 13 % – на Ирактаконском. Скважины на Чонском и Татариновском участ-

ках законсервированы, запасы по ним утверждены по категории С₂ в 2015 г.

Целью представленной работы было уточнение геологической модели Верхнечонского месторождения технических подземных вод (МТПВ), переоценка запасов по промышленной категории, создание геофiltрационной модели.

Материалы и методы исследования

Сведения о геологических, гидрогеологических и мерзлотных условиях территории приведены в соответствии с данными источников¹ [1–9], а также результатами работ на месторождении, изложенными в статьях [10–12]. В геологическом строении Верхнечонского месторождения принимают участие образования архея-протерозоя, карбонатные породы нижнего и среднего отделов кембрия и осадочные породы среднего и верхнего отделов кембрия и юрской системы, а также четвертичные отложения. Нефтегазоносность Верхнечонского НГКМ связана с песчаниками и карбонатами венда и нижнего кембрия.

В рамках настоящей работы глубина изучения геологического разреза ограничивалась зоной свободного водообмена – вскрытием пород ангарской свиты нижнего кембрия (глубиной до 350 м). Отложения ангарской свиты

¹ Байкало-Амурская железнодорожная магистраль: геокриологическая карта. М-1:2500000. М., 1979.

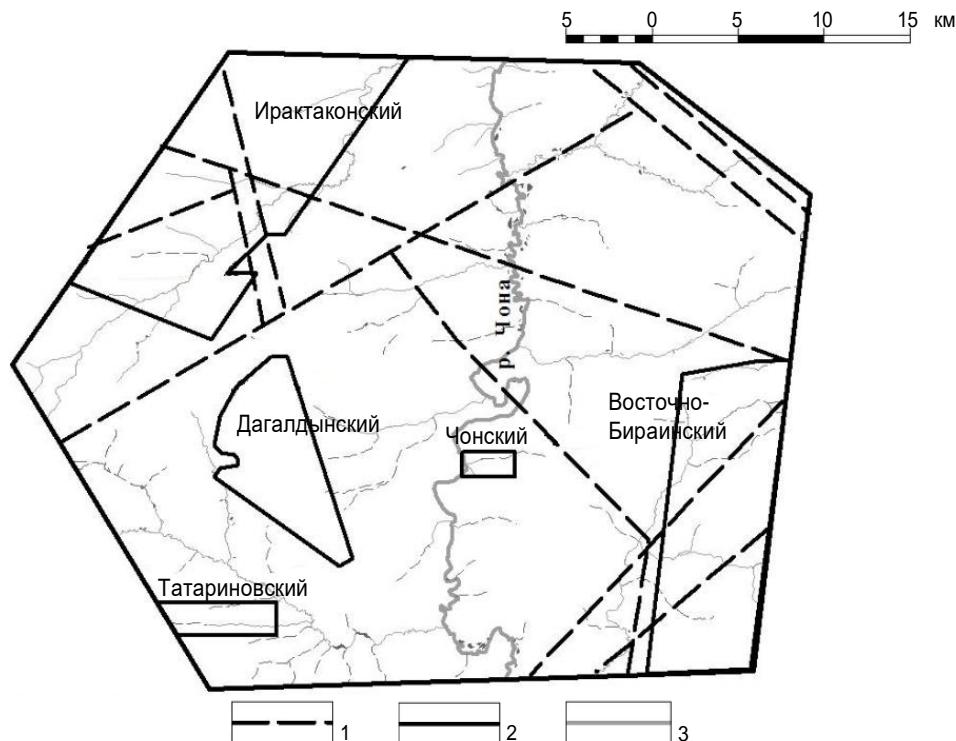


Рис. 1. Участки Верхнечонского месторождения технических подземных вод:

1 – тектонические нарушения; 2 – границы участков; 3 – реки

Fig. 1. Sites of the Verkhnechonskoye deposit of technical groundwater:

1 – tectonic disturbances; 2 – site boundaries; 3 – rivers

выше перекрываются нижне-среднекембрийскими отложениями литвинцевской свиты. Ее мощность изменяется от 130 до 210 м. На породах литвинцевской свиты согласно залегают осадочные нерасчлененные средне-верхнекембрийские отложения верхоленской и илгинской свит мощностью от 20 до 200 м. Несогласно на породах верхнего кембрия залегают отложения нижней юры мощностью до 80 м. Четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены различными генетическими типами, преобладающими же являются аллювиальные и элювиально-делювиальные отложения со средней мощностью 1–3 м.

Объектом эксплуатации являются два водоносных горизонта: верхоленско-илгинский горизонт средне-верхнекембрийского возраста (песчаники, трещиноватые алевролиты, аргиллиты, характеризуются частым переслаиванием разных пород с мощностью прослоев от нескольких миллиметров до нескольких метров, цвет пород – преимущественно вишнево-красный, красно-коричневый, прослоями – травяно-зеленый; все породы в разной степени загипсованы, более интенсивно –

в нижней части разреза) и литвинцевский горизонт нижне-среднекембрийского возраста (доломиты и известняки от светло-серых до темно-серых с желтым и коричневатым оттенком, массивные, слоистые, водорослевые, брекчиевидные; в верхней части разреза имеются прослои зеленовато-серых алевролитов, глинистых доломитов, гипс-ангидритов). В рамках данной работы они рассматриваются как единый верхоленско-литвинцевский водоносный комплекс.

Система поддержания пластового давления на Верхнечонском НГКМ реализована следующим образом: скважины объединены в водозаборы, с которых вода поступает на установку подготовки артезианской воды, затем – на установку подготовки нефти УПН-1, где происходит смешение с подтоварной водой, отстаивание, нагрев и другие этапы водоизготовки. Далее вода направляется на блочную кустовую насосную станцию, затем через блоки гребенок осуществляется разводка по нагнетательному фонду.

Сложная организация системы поддержания пластового давления приводит к непостоянству работы водозаборных скважин как из-



за перемен давления в самой сети низкона-порных водоводов, протяженность которых составляет на Верхнечонском НГКМ 93 км, так и по причине изменений добычи нефти в связи с корректировками профиля (соответственно, и потребности в воде), приемистостью нагнетательных скважин, особенностями функционирования на установке подготовки артезианской воды и блочной кустовой насосной станции, а также другими технологическими процессами. Данные режимных наблюдений за работой водозаборов отличаются сложными зависимостями, и их использование ограничено при переоценке запасов подземных вод. Эти материалы могут быть частично использованы с учетом корректировок. С учетом того, что замеры уровней и дебитов выполняются ежедневно на протяжении многих лет, сформирован огромный массив данных, часто имеющий различные формы представления информации по годам. Частично работа была автоматизирована с использованием сводных таблиц и макросов на базе MS Excel. Основные проблемы, выявленные при обработке данных режимных наблюдений, заключаются в том, что в ходе эксплуатации неизбежны аварийные остановки, остановки на плановые ремонты, при которых происходит смена оборудования, в некоторых случаях даже на оборудование другой производительности, соответственно, графики зависимости дебита от уровня в эти периоды искажаются, что требует отдельного рассмотрения каждого такого участка, привлечения данных по ремонтным работам. Также изменение графиков бывает связано с искусственным ограничением в добыче воды, истощением запасов, что приводит к необходимости выполнения анализа по каждой скважине с привлечением данных по закачке жидкости в систему поддержания пластового давления по каждому проблемному периоду. В результате возможность использования режимных данных для переоценки запасов оказывается ограниченной. Тем не менее они учтены для контроля в качестве усредненных показателей разработки месторождений.

В 2018 г. перед специалистами ООО «Тюменский нефтяной научный центр» была поставлена задача провести переоценку запа-

сов подземных вод на действующих участках Верхнечонского НГКМ по промышленной категории В. На тот момент запасами по категории В потребность в подземных водах для целей поддержания пластового давления была обеспечена менее чем на половину. При этом проектные нагрузки были определены исходя из дебитов скважин, полученных при строительных откачках в необвязанных скважинах. После подключения скважин к системе водоводов их производительность снизилась из-за дополнительного давления, создаваемого в системе. Таким образом, при распределении проектных нагрузок имеет значение не максимальная производительность скважин, а фактическая, полученная в ходе анализа опыта эксплуатации всего водозабора. Откачки «на рельеф» при таком подходе необходимы лишь для получения кондиционных параметров (водопроводимости и пьезопроводности).

С учетом того, что в некоторых выработках фонда скважин были выполнены кратковременные и не всегда кондиционные откачки, гидродинамические условия за годы эксплуатации изменились, а гидрогеологические параметры требуют подтверждения, было принято решение провести комплекс опытно-фильтрационных работ.

Выполнение откачек на крупных месторождениях, эксплуатируемых с целью водоснабжения объектов с постоянной потребностью, часто представляется нетривиальной задачей в связи с невозможностью остановки фонда скважин. В случае с Верхнечонским НГКМ сроки проведения опытно-фильтрационных работ были подобраны таким образом, чтобы они совпадали с плановыми профилактическими работами на фонде нефтяных и нагнетательных скважин, что минимизировало потери по добыче углеводородов вследствие дефицита воды в системе поддержания пластового давления. За период полевых работ проведены две групповые и шесть одиночных откачек. В групповой откачке на Восточно-Бираинском участке было задействовано 15 скважин, 13 из которых являлись возмущающими; суммарный дебит откачки составил $6476 \text{ м}^3/\text{сут}$. В групповой откачке на Ирактаконском участке было задействовано 5 скважин, 4 из которых были возмущающими;



суммарный дебит составил 2175 м³/сут. Длительность опыта на Восточно-Бираинском участке составила около пяти суток, на Ирактаконском – около двух суток. Перед каждым испытанием исследуемый фонд скважин отключался на сутки для фиксации текущего статического уровня, при этом фонд водозаборных скважин на соседних эксплуатационных участках выводился на режим работы с постоянным дебитом.

Пригодность скважин для проведения опытно-фильтрационных работ оценивалась по следующим критериям: наличие пьезометра, высокая производительность, расположение в группе скважин, наличие наблюдательных скважин на вышележащий верхоленско-илгинский горизонт. Для получения кондиционных параметров откачки проводились в водоно-критичный период, однако работы не удалось выполнить в полном объеме по причине низких температур воздуха. Впрочем, результаты зимних опытов оказались сопоставимы с результатами исследований, проведенных повторно в летний период, что говорит о минимальном влиянии сезонности на гидродинамический режим исследуемых водоносных подразделений.

Рассмотрим результат одного из опытов на Восточно-Бираинском участке Верхнечон-

ского МТПВ. Возмущающая скважина 2*-Д, каптирующая нижне-среднекембрийский водоносный горизонт, расположена на расстоянии 7,5 м от скважины 2*-Г, каптирующей средне-верхнекембрийский водоносный горизонт. После начала откачки с дебитом 886 м³/сут. уже через восемь минут уровень воды в наблюдательной скважине начал понижаться, через пять часов разница динамических уровней в скважинах 2*-Д и 2*-Г составляла не более 0,1 м (рис. 2).

Приведенный на рис. 2 график наглядно демонстрирует отсутствие непроницаемой границы между средне-верхнекембрийским и нижне-среднекембрийским водоносными горизонтами и единый характер напорного режима, что позволяет схематизировать их как единый водоносный комплекс. Аналогичные результаты были получены и на других действующих водозаборных участках Верхнечонского МТПВ.

Значимой характеристикой для обоснования объекта как единого водоносного комплекса является химический состав подземных вод. В северной части Верхнечонского лицензионного участка подземные воды верхоленской и илгинской свит относятся к гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-сульфатным с минерализацией до 0,43 г/дм³, а воды литвин-

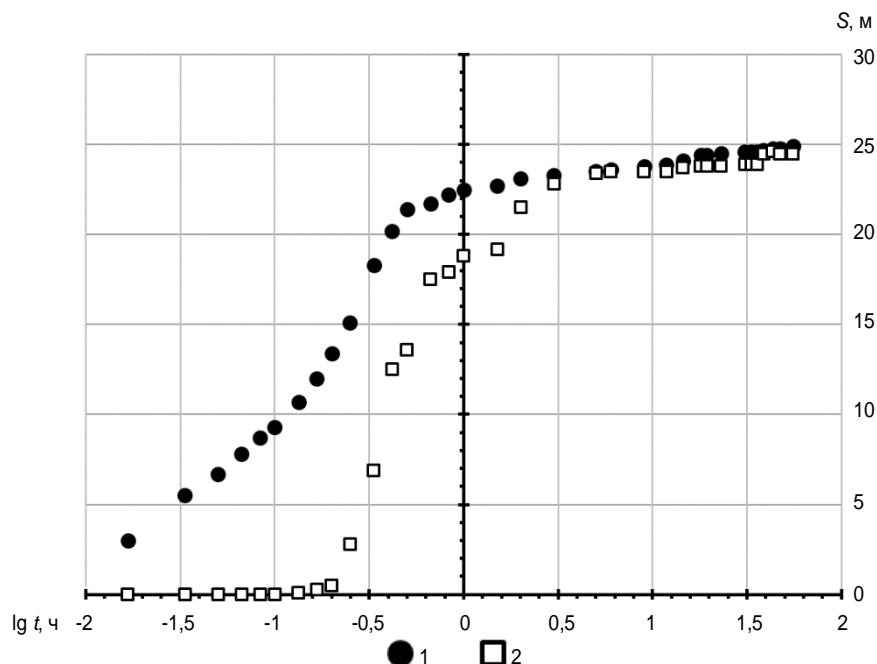


Рис. 2. График временного прослеживания уровня в координатах S - $\lg(t)$:

1 – скважина 2*-Д; 2 – скважина 2*-Г

Fig. 2. Graph of level temporal tracing in S - $\lg(t)$ coordinates:

1 – well 2*-Д; 2 – well 2*-Г



цевской свиты – к сульфатным с минерализацией до 2,41 г/дм³. В юго-западном направлении картина меняется: по результатам лабораторных исследований проб, отобранных в скважинах, каптирующих только верхоленскую и илгинскую свиты, воды могут быть гидрокарбонатными, сульфатными или сульфатно-гидрокарбонатными, то же самое наблюдается относительно скважин, каптирующих только литвинцевскую свиту [13]. Минерализация изменяется от 0,27 до 2,23 мг/дм³, причем ее значения не коррелируют с глубиной вскрытия объекта, что еще раз подтверждает наличие гидравлической связи между средневерхнекембрийскими и нижне-среднекембрийскими отложениями.

По результатам групповых и одиночных откачек величина водопроводимости при обработке результатов опытно-фильтрационных работ графоаналитическим методом составила от 73 до 1273 м²/сут., что характеризует пласт как весьма неоднородный. Значения пьезопроводности изменяются в диапазоне 4,7·10⁴–2,8·10⁷ м²/сут. Результаты хорошо коррелируют со значениями водопроводимости, полученными в ходе ранее проведенных на Верхнечонском МТПВ работ, и в целом характерны для данного района.

Анализ данных режимных наблюдений не позволил получить гидродинамические параметры из-за неясного характера зависимостей дебита от понижений вследствие взаимовлияния скважин, но лег в основу обоснования проектных нагрузок. В качестве нагрузок были приняты значения объемов добычи, при которых не происходило значительных скачков динамического уровня. Прогнозные понижения при этом не превысили допустимых. Результаты расчета допустимых понижений при применении различных схематиза-

ций гидрогеологических условий приведены в таблице.

Вывод о существовании взаимосвязи между водоносными горизонтами верхоленско-илгинской и литвинцевской свит подтвердился в ходе анализа результатов интерпретации геофизических исследований скважин. Комплекс геофизических исследований скважин, принятый в работе, является классическим при гидрогеологических исследованиях и показывает свою эффективность при расчленении разреза и выделении водоносных интервалов [14, 15]. Во всех предыдущих работах каждый из них рассматривался как отдельный ограниченный сверху и снизу объект. Аналогичная природная гидрогеологическая модель была принята и на соседних лицензионных участках. Действительно, по данным ранее выполненных поисково-оценочных работ в северной части Верхнечонского МТПВ, где проводились работы с отбором керна, в подошве верхоленской свиты наблюдается загипсованность [11, 12]. Тем не менее в разрезе участков действующих водозаборов, расположенных на юго-востоке и западе месторождения, алевролиты и аргиллиты в подошве верхоленской свиты являются водоносными (рис. 3).

При подсчете запасов гидродинамическим методом благодаря объединению водоносных горизонтов по многим скважинам выявлен значительный запас понижения, который в будущем в случае увеличения потребности промысла в подземных водах позволит провести переоценку с возросшими нагрузками.

Кроме традиционного гидродинамического метода при переоценке запасов был использован метод численного моделирования, за рекомендовавший себя как эффективный инструмент при оценке запасов на крупных

Сравнение результатов расчета допустимых понижений Comparison of calculation results of permissible drawdown

Участок	Скважина	Допустимое понижение при схематизации с учетом непроницаемой границы, м	Допустимое понижение при схематизации с единым водоносным комплексом, м (принято по результатам доразведки)	Прогнозное понижение, м
Восточно-Бираинский	2**-Д	36	55	32,6
Дагалдынский	1-Б**	72	90	63,9

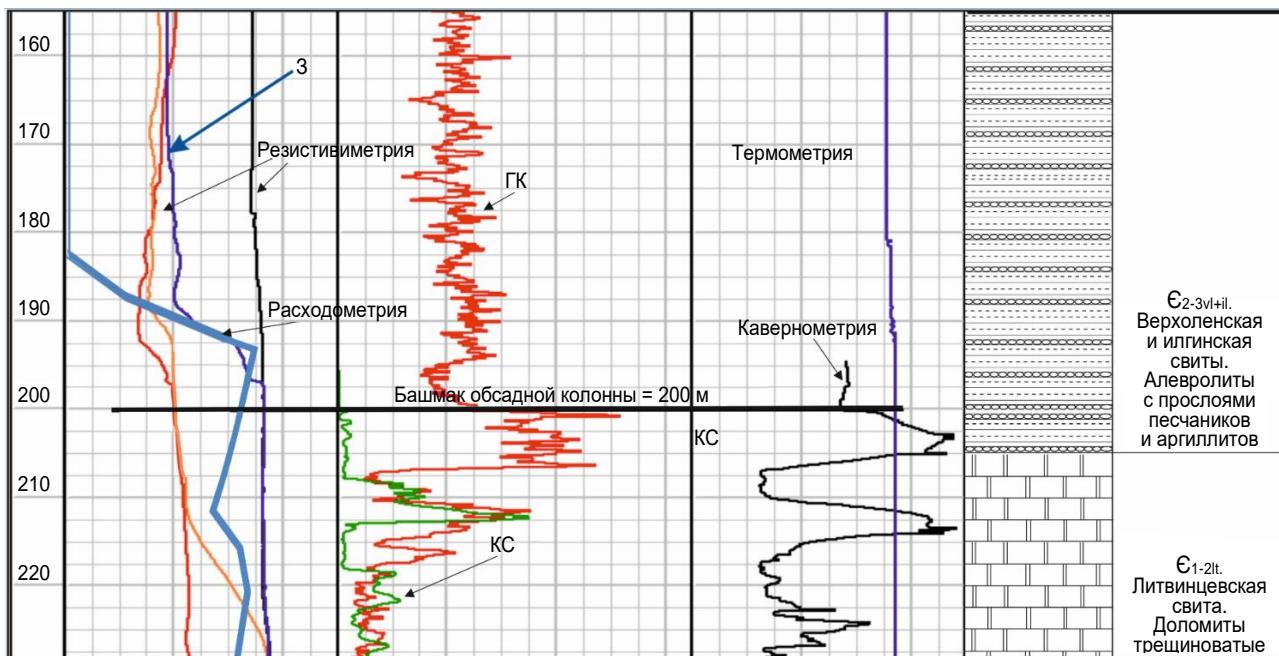


Рис. 3. Фрагмент геофизического планшета по скважине 2*-Д
Fig. 3. Fragment of a geophysical tablet for the well 2*-Д

месторождениях со сложной историей разработки [16–20]. В программном комплексе Visual ModFlow Flex 6.1 построена геофильтрационная модель Верхнечонского МТПВ, представленная двумя расчетными слоями – собственно изучаемого водоносного комплекса и проекции кровли ангарской свиты, находящейся на 70 м ниже фактических отметок структурного профиля, что необходимо для моделирования геомиграции. Поверхности были построены по данным бурения разведочных и водозаборных скважин. Для построения модели были использованы сведения о конструкциях скважин, результаты режимных наблюдений, сведения о фильтрационно-емкостных свойствах пород, полученных по результатам опытно-фильтрационных работ в период 2007–2019 гг., результаты лабораторных исследований воды.

Численная конечно-разностная модель основана на решении нестационарного дифференциального уравнения фильтрации подземных вод (закон Дарси) для напорного неограниченного в плане пласта.

Важно отметить, что настройка и калибровка модели выполнены на основе данных динамического уровня в эксплуатационных скважинах, начальной датой модели принято 1 января 2016 г. Данный подход оправдан и может быть использован при решении анало-

гичных задач, так как информации по статическим уровням часто бывает недостаточно ввиду непрерывной эксплуатации месторождения, при которой краткосрочные остановки эксплуатационных скважин не позволяют уровню восстановиться. Кроме того, использование данных по статическим уровням при бурении для калибровки модели ограничено, так как замеры являются разновременными, а бурение происходило на различных стадиях эксплуатации, что делает сравнение полученных результатов затруднительным. Выполнение калибровки модели по данным динамических уровней является достаточно сложной задачей, в процессе ее решения выявлено, что по близкорасположенным скважинам ввиду разной величины скин-эффекта, величины дебита, а также характера и степени вскрытия целевого объекта наблюдается высокий градиент напора, искажающий реальную гидродинамическую картину. С целью компенсации градиента напора по локальным участкам, а также для моделирования его дополнительной сработки за счет несовершенства в расчетных ячейках по 20 из 64 эксплуатационных скважин были активированы граничные условия «дрена» (*от англ.: drain*), симулирующие извлечение жидкости из домена модели с заданным коэффициентом дренирования от 3 до 50 м²/сут.



В ходе калибровки модели достигнутая степень расхождения расчетных и фактических данных не превысила 8,6 % при допустимом пороге 10 % (рис. 4). Привлечение метода геофильтрационного моделирования позволило ответить на некоторые вопросы о тектоническом строении района. При калибровочных итерациях было четко установлено наличие двух гидродинамических барьеров в пределах Восточно-Бираинского участка, выражающихся в резком перепаде напоров между водозаборными скважинами. Благодаря этому была снята неопределенность относительно характера разломов, ограничивающих Бираинский горст, подтверждено их существование и уточнена тектоническая структура участка (рис. 5). Для их симуляции в модели использованы горизонтальные слабопроницаемые границы. Толщина непроницаемых границ была задана равной 30 м с величиной K_x и K_y 0,001 м/сут. Ранее данная структура не учитывалась при оценке запасов, что приводило к искажению в понимании структуры потока подземных вод. Также дополнительный гидродинамический барьер был зафиксирован в пределах Дагалдынского участка. Ранее этот барьер в ходе геологоразведочных работ также не выявлялся.

Также одной из проблем Верхнечонского МТПВ является спонтанное периодическое

появление сероводорода в воде скважин, вскрывающих интервалы, близкие к кровле нижнекембрийских отложений (ангарской свиты). Учитывая, что сероводород в силу его физико-химических свойств не сорбируется на частицах породы, а также не вступает в химические реакции с подземными водами целевого объекта по причине их малой минерализации, равно как и с элементами вмещающих горных пород, можно сделать вывод о том, что его концентрация будет определяться процессом гидродинамической дисперсии. В модели принято значение шага дисперсии в 10 м как наименее благоприятное для расчета пессимистичного варианта распространения сероводорода. В результате моделирования геомиграции установлено, что наибольшие концентрации (от 2 до 5,5 мг/дм³ сероводорода) соответствуют Восточно-Бираинскому и Дагалдынскому эксплуатационным участкам. Эксперимент с установкой узла контроля коррозии на трубопроводе АО «Верхнечонскнефтегаз» показал, что скорость коррозии составляет 0,97 мм в год, что оценивается как сильная степень и требует применения ингибиторов коррозии либо выполнения мероприятий по защите трубопроводов и оборудования. Высокие концентрации сероводорода объясняются значительной эксплуатационной нагрузкой на первом участке

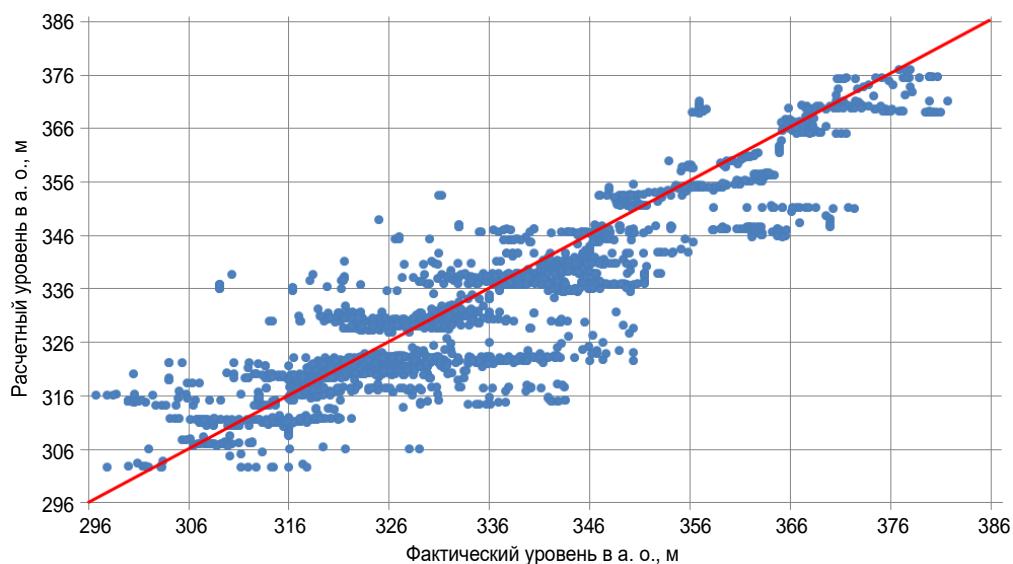


Рис. 4. Итоговый график сходимости расчетных и фактических уровней по эксплуатационным скважинам

Расхождение расчет / факт – 8,6 %; среднее расхождение – 1,3 м; коэффициент корреляции – 0,9

Fig. 4. The final convergence graph of predicted and actual levels for production wells

Predicted discrepancy / actual – 8.6 %; average discrepancy – 1.3 m; correlation coefficient – 0.9

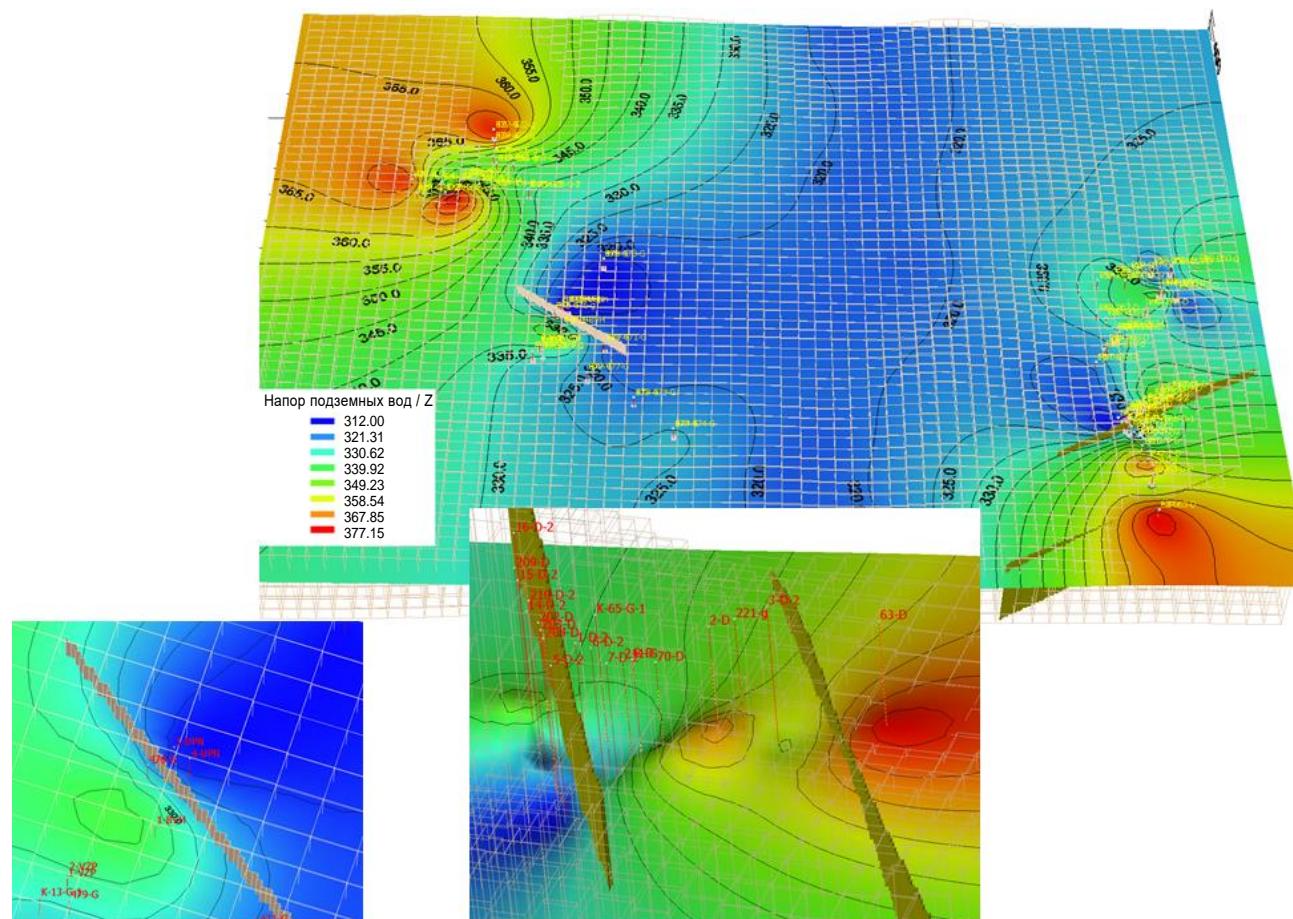


Рис. 5. Симуляция слабопроницаемых границ в модели, отражающая резкие перепады напора как между отдельными скважинами, так и между группами скважин

Величина коэффициента фильтрации – 0,001 м/сут., толщина границ – 30 м

Fig. 5. Simulation of low-permeability boundaries in the model that reflects sharp pressure head drops both between individual wells and groups of wells

The value of the filtration coefficient is 0.001 m/day; the boundary thickness is 30 m

и близостью кровли ангарской свиты на втором. Таким образом, прогнозные концентрации сероводорода в добываемой воде будут составлять от 0,5 до 5,5 мг/дм³ (рис. 6).

Результаты исследования

Результатом проведения и интерпретации работ стало обоснование природной гидрогеологической модели, отличной от принятой ранее. Так, доказана связь двух водоносных комплексов – верхоленско-илгинского комплекса верхне-среднекембрийского возраста и литвинцевского комплекса нижне-среднекембрийского возраста. В результате работ в программном обеспечении Visual ModFlow Flex создана геофильтрационная модель, хорошо согласованная с фактическими данными, которая позволила выявить непроницаемые барьеры, а также спрогнозировать геомиграцию сероводорода. Запасы подземных

вод месторождения впервые поставлены на государственный баланс в полном объеме по промышленной категории В, переоценка выполнена по трем участкам месторождения, откорректированы нагрузки на скважины для оптимальной работы водозаборов.

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Главной особенностью геологического строения Верхнечонского МТПВ является отсутствие непроницаемой границы между нижне-среднекембрийским и средне-верхнекембрийским водоносными горизонтами в западной и восточной частях лицензионного участка, что удалось подтвердить в ходе анализа результатов интерпретации геофизических исследований скважин и проведения опытно-фильтрационных работ.

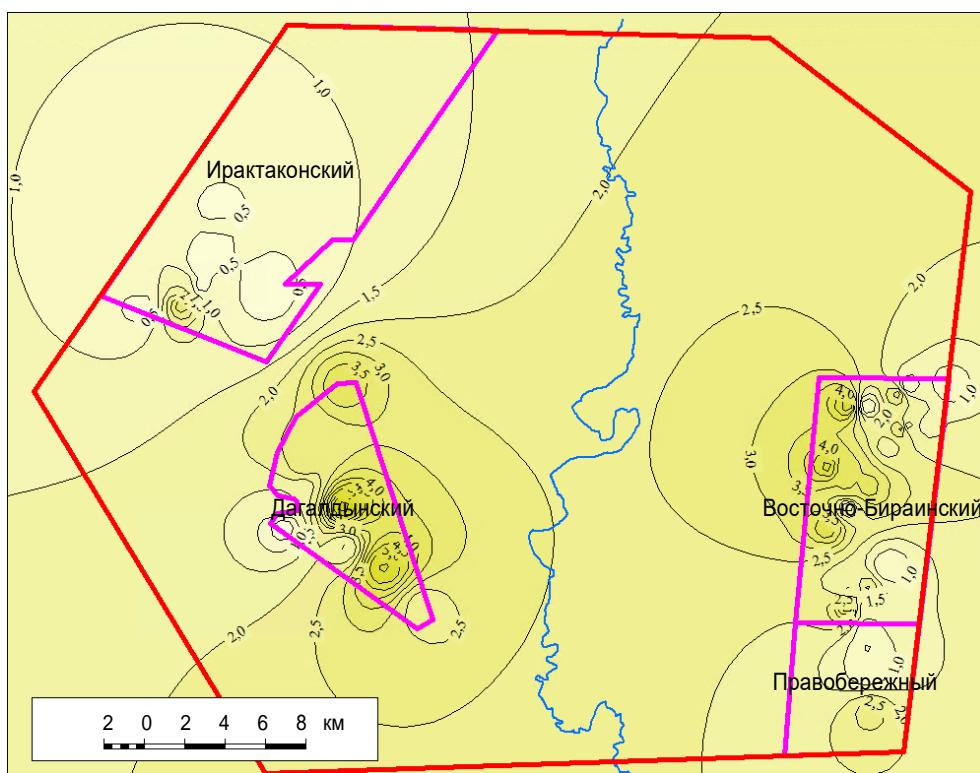


Рис. 6. Результаты прогнозного моделирования процесса геомиграции сероводорода на конец прогнозного периода (1 сентября 2044 г.)

Fig. 6. Results of predictive modeling of hydrogen sulfide geomigration at the end of the forecast period (September 1, 2044)

2. Объединение водоносных горизонтов позволило увеличить проектные нагрузки на водозаборные скважины в связи с изменением величины допустимого понижения.

3. Геофильтрационное моделирование в сложных гидрогеологических условиях позволяет уточнить тектоническую структуру месторождения, выявить зоны разломов и определить характер влияния выделяемых объектов

на гидродинамический режим.

4. С помощью компьютерного моделирования можно сделать прогноз миграции отдельных химических веществ и показателей.

5. По итогам описанных решений удалось выполнить переоценку с двукратным увеличением запасов подземных вод по категории В и успешно пройти государственную геологическую экспертизу отчета.

Список источников

1. Гидрогеология СССР. В 50 т. Т. 19. Иркутская область / ред. В. Г. Ткачук. М.: Недра, 1968. 496 с.
2. Блохин Ю. И. Особенности формирования пресных подземных вод в связи с геологическим строением Ленского нефтеносного района // Материалы IV совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск – Владивосток, 1964. С. 102–103.
3. Блохин Ю. И. Естественные ресурсы пресных подземных вод малых бассейнов в верхнем течении р. Лены // Материалы V совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск – Тюмень, 1967. С. 213–214.
4. Блохин Ю. И. Типы малых бассейнов верхнего Приленья // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. Иркутск, 1971. С. 103–107.
5. Замараев С. М. Тектоническое строение и история геологического развития юго-восточной части Сибирской платформы // Геофизические исследования и проблемы нефтегазоносности юга Сибирской платформы. Вып. 2. М.: Гостоптехиздат, 1962. С. 128–193.
6. Лещиков Ф. Н. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1978. 141 с.
7. Ломоносов И. С., Кустов Ю. И., Пиннекер Е. В. Минеральные воды Прибайкалья. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1977. 223 с.
8. Пиннекер Е. В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна: закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование. М.: Наука, 1966. 332 с.
9. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И. Подземные воды зоны Байкало-Амурской магистрали. Новосибирск: Наука, 1977. 85 с.
10. Малков Д. С. Гидрогеологические условия нефтегазоносности Верхнечонского газоконденсатно-



- нефтяного месторождения // Гео-Сибирь. 2010. Т. 2. № 1. С. 18–21.
11. Шенькман Б. М. Зона свободного водообмена Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения в начале этапа промышленной эксплуатации // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 7. С. 129–144.
 12. Шенькман Б. М. Ресурсы подземных вод Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 77–84.
 13. Шенькман Б. М. Химия подземных вод Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения (ВЧНГКМ) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2013. Т. 6. № 1. С. 206–222.
 14. Гринбаум И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород. М.: Недра, 1965. 188 с.
 15. Гершанович И. М. Гидрогеологические исследования в скважинах методом расходометрии. М.: Недра, 1981. 295 с.
 16. Аксеновская А. А., Валеев Р. Р., Гринченко В. А., Савельев Е. А. Практика определения гидродинамических параметров по результатам ОФР и геофильтрационного моделирования на примере Среднеботубинского МТПВ // Недропользование XXI век. 2020. № 5. С. 63–69.
 17. Московцева Д. А., Кичигин Е. В. Геофильтрационное моделирование и характеристика подземных вод Лебединского месторождения // Геология, география и глобальная энергия. 2021. № 2. С. 68–73. <https://doi.org/10.21672/2077-6322-2021-81-2-068-073>.
 18. Самарцев В. Н. Оценка геофильтрационной однородности водоносного горизонта методом автоматической калибровки модели // Инженерные изыскания. 2013. № 12. С. 32–39.
 19. Гриневский С. О., Иванова Я. В., Сафонов А. О. Оценка естественных ресурсов подземных вод на основе геогидрологического моделирования инфильтрационного питания // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. № 5. С. 45–52. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2016-5-45-52>.
 20. Рошаль А. А., Потапова Е. Ю. Гидродинамическое и миграционное моделирование при оценке запасов подземных вод (на примере Московского региона) // Недропользование XXI век. 2012. № 2. С. 70–75.

References

1. Tkachuk V. G. *Hydrogeology of the USSR*. In 50 vol. Vol. 19. Irkutsk region. Moscow: Nedra; 1968. 496 p. (In Russ.).
2. Blokhin Yu. I. Formation features of fresh groundwater in terms of the geological structure of the Lena oil-bearing area. In: *Materialy IV soveshchaniya po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka = Materials of the 4th meeting on groundwater of Siberia and the Far East*. Irkutsk – Vladivostok; 1964, p. 102–103. (In Russ.).
3. Blokhin Yu. I. Natural resources of fresh groundwater in the small basins of the upper Lena river. In: *Materialy V soveshchaniya po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka = Materials of the 5th meeting on the groundwater of Siberia and the Far East*. Irkutsk – Tyumen; 1967, p. 213–214. (In Russ.).
4. Blokhin Yu. I. Types of small basins of the upper Lena region. In: *Geologiya i poleznye iskopаемые Vostochnoi Sibiri = Geology and minerals of Eastern Siberia*. Irkutsk; 1971, p. 103–107. (In Russ.).
5. Zamaraev S. M. Tectonic structure and history of geological development of the Southeastern part of the Siberian platform. In: *Geofizicheskie issledovaniya i problemy neftegazonosnosti yuga Sibirskoi platform = Geophysical research and issues of the oil and gas potential in the south of the Siberian Platform*. Iss. 2. Moscow: Gostoptekhizdat; 1962, p. 128–193. (In Russ.).
6. Leshchikov F. N. *Frozen rocks of the Angara and Baikal region*. Novosibirsk: Nauka; 1978. 141 p. (In Russ.).
7. Lomonosov I. S., Kustov Yu. I., Pinneker E. V. *Mineral waters of the Baikal region*. Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1977. 223 p. (In Russ.).
8. Pinneker E. V. *Brines of the Angara-Lena Artesian basin: distribution patterns, composition, dynamics, formation and use*. Moscow: Nauka; 1966. 332 p. (In Russ.).
9. Pinneker E. V., Pisarskii B. I. *Underground waters of the Baikal-Amur Mainline zone*. Novosibirsk: Nauka; 1977. 85 p. (In Russ.).
10. Malkov D. S. Hydrogeological conditions for oil-and-gas-content of the Verkhnechonskoye gas-condensate-oil field. *Geo-Sibir'*. 2010;2(1):18-21. (In Russ.).
11. Shenkman B. M. Free water exchange zone of Verkhnechonskoye oil-gas-condensate deposit in the early stage of the industrial operation. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle = The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2014;7:129-144. (In Russ.).
12. Shenkman B. M. Groundwater resources of the Verkhnechonskoye oil and gas condensate field. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2013;3:77-84. (In Russ.).
13. Shenkman B. M. The groundwater chemistry of Verkhnechonskoye oil-gas-condensate deposit (VCHOGCD). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle = The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2013;6(1):206-222. (In Russ.).
14. Grinbaum I. I. *Geophysical methods to determine filtration properties of rocks*. Moscow: Nedra; 1965. 188 p. (In Russ.).
15. Gershmanovich I. M. *Hydrogeological studies in wells by the flowmetry method*. Moscow: Nedra; 1981. 295 p. (In Russ.).
16. Aksenovskaya A. A., Valeev R. R., Grinchenko V. A., Savelyev E. A. Determination of hydrodynamic parameters on the result of testing for groundwater inflow and geofiltration simulation by the example of Srednebotubinskoye technical groundwater deposit. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2020;5:63-69. (In Russ.).
17. Moskovtseva D. A., Kichigin E. V. Geofiltration modeling and characterization of the Lebedinsky under-



ground water. *Geologiya, geografiya i global'naya energetika = Geology, geography and global energy.* 2021;2:68-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.21672/2077-6322-2021-81-2-068-073>.

18. Samartsev V. N. Estimation of aquifer heterogeneity with automatic model calibration. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering Survey.* 2013;12:32-39. (In Russ.).

19. Grinevskiy S. O., Ivanova Y. V., Safonov A. O. An assessment of the groundwater resources based on infiltration

recharge hydrogeological modeling. *Izvestiya vuzov. Neftyanaya promstvost'*. 2013;12:32-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2016-5-45-52>.

20. Roshal A. A., Potapova E. Y. Hydrodynamic and migration modeling at an assessment of stocks of underground waters (on an example of the Moscow region). *Nedropol'zovanie XXI vek.* 2012;2:70-75. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Теняков Егор Олегович,
главный специалист,
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,
г. Тюмень, Россия,
eotenyakov@tnnc.rosneft.ru.

Egor O. Tenyakov,
Chief Specialist,
Tyumen Oil Research Center LLC,
Tyumen, Russia,
eotenyakov@tnnc.rosneft.ru.



Савельев Евгений Александрович,
руководитель группы по геологическому сопровождению
проектов Восточной Сибири,
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,
г. Тюмень, Россия,
easavelyev@tnnc.rosneft.ru.

Evgeny A. Saveliev,
Head of the Group for Project Geological Support in Eastern Siberia,
Tyumen Oil Research Center LLC,
Tyumen, Russia,
easavelyev@tnnc.rosneft.ru.



Данилова Мария Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий геолог,
ООО «Верхнечонскнефтегаз»,
г. Иркутск, Россия,
madanilova@rosneft.ru.

Maria A. Danilova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Geologist,
Verkhnechonskneftegaz LLC,
Irkutsk, Russia,
madanilova@rosneft.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Теняков Е. О., Данилова М. А. разработали концепцию статьи, подготовили текст статьи, приняли активное участие в полевых и камеральных работах; Савельев Е. А. подготовил текст статьи, принял активное участие в камеральных работах.

Tenyakov E. O., Danilova M. A. developed the concept of the article, prepared the text of the article, took an active part in the field and desk works. Saveliev E. A. prepared the text of the article, took an active part in the desk works.

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 28.02.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 13.05.2022.

The article was submitted 28.02.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 13.05.2022.



Научная статья

УДК 624.131.1

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>



Инженерно-геологическая оценка скальных грунтов на примере анализа коллекции образцов Албазинского месторождения

Тамара Гурьевна Ряшенко^a, Егор Александрович Маслов^b, Евгений Вадимович Брыжак^c,
Татьяна Александровна Корнилова^d, Юлия Владимировна Вашестюк^e,
Александр Юрьевич Болотнев^f

^{a-d}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^{e,f}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Вашестюк Юлия Владимировна, vashestyuk_yv@istu.edu

Резюме. В данной статье представлена инженерно-геологическая оценка скальных грунтов Албазинского месторождения (север Хабаровского края, Россия), проведенная на примере анализа коллекции образцов различных петрографических типов определенных геологических формаций. Цель исследований заключалась в реализации специально разработанной комплексной методической схемы, включающей оптический метод (анализ шлифов), измерение сейсмических (поверхностное и сквозное прозвучивание образцов для определения скорости продольных сейсмических волн), прочностных (вертикальное сжатие и растяжение) и физических (плотность и водопоглощение) свойств. На основе полученных данных выполнен сравнительный анализ образцов по результатам данных сейсмических, прочностных и физических свойств с учетом петрографической информации. Установлена анизотропия по сейсмическим и прочностным свойствам, определены коэффициенты корреляции между показателями свойств с помощью программы кластерного анализа. На примере материалов коллекции показано, что различия скорости продольных сейсмических волн и прочности определяются текстурно-структурными особенностями и составом скальных грунтов, которые изучаются на микроуровне.

Ключевые слова: скальный грунт, петрографический шлиф, структура, текстура, состав, сейсмические свойства, прочностные свойства, физические свойства, кластерный анализ

Для цитирования: Ряшенко Т. Г., Маслов Е. А., Брыжак Е. В., Корнилова Т. А., Вашестюк Ю. В., Болотнев А. Ю. Инженерно-геологическая оценка скальных грунтов на примере анализа коллекции образцов Албазинского месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 197–210. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>.

Original article

Engineering-geological assessment of rocky soils based on the analysis of the collection of Albazinskoye deposit samples

Tamara G. Ryashchenko^a, Egor A. Maslov^b, Evgeny V. Bryzhak^c,
Tatiana A. Kornilova^d, Yulia V. Vashestyuk^e, Alexander Yu. Bolotnev^f

^{a-d}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^{e,f}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Yulia V. Vashestyuk, vashestyuk_yv@istu.edu

Abstract. The article deals with the engineering-geological assessment of the rocky soils of the Albazinskoye deposit located in the north of the Khabarovsk Territory, Russia conducted on the example of the analysis of the collection of samples of various petrographic types of certain geological formations. The purpose of the research is to implement a specially developed complex methodological scheme including an optical method (analysis of thin rock sections), measurement of seismic (surface and through sounding of samples to determine longitudinal seismic wave velocity), strength (vertical compression and tension) and physical (density and water absorption) properties. Using the obtained data, a comparative analysis of samples is performed based on the results of seismic, strength and physical properties taking into account petrographic information. Anisotropy in terms of seismic and strength properties is established. Using a cluster

© Ряшенко Т. Г., Маслов Е. А., Брыжак Е. В., Корнилова Т. А., Вашестюк Ю. В., Болотнев А. Ю., 2022



analysis program, the correlation coefficients between property indicators are determined. On example of the materials of the collection, it is shown that the differences in the velocity of longitudinal seismic waves and strength are determined by the textural-structural features and composition of rocky soils, which are studied at the micro level.

Keywords: rocky soil, petrographic rock section, structure, texture, composition, seismic properties, strength properties, physical properties, cluster analysis

For citation: Ryashchenko T. G., Maslov E. A., Bryzhak E. V., Kornilova T. A., Vashestyuk Y. V., Bolotnev A. Yu. Engineering-geological assessment of rocky soils based on the analysis of the collection of Albazinskoye deposit samples. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(2):197-210. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>.

Введение

Месторождения твердых полезных ископаемых (в настоящее время это преимущественно открытые разработки) можно рассматривать как природно-техногенную систему, изучение которой на современном этапе развития инженерной геологии следует считать наиболее перспективным научным направлением. Инженерная геология месторождений объединяет выполнение следующих задач: организация геологического пространства, оценка динамики земной коры и детальное изучение геологической среды¹. При изучении месторождений твердых полезных ископаемых под детальной характеристикой геологической среды подразумевается инженерно-геологическое классифицирование грунтов, характеристика их состава и свойств, степени обводненности.

В настоящее время для оценки состояния скальных массивов месторождений установлены специальные индексы [1–6]. Кроме того, материалы XII конгресса Международной ассоциации по инженерной геологии и охране окружающей среды, который состоялся в июне 2014 г. в Турине (Италия), подтвердили необходимость детального изучения инженерно-геологических особенностей скальных образцов и массивов на микроуровне [6]. В последние годы среди российских публикаций появились работы по вопросам формирования физико-механических свойств различных петрографических типов пород (скальных грунтов), например эффузивов и базальтоидов [7, 8].

Следует заметить, что на юге Восточной Сибири скальные грунты традиционно изуча-

лись значительно реже, чем дисперсные. В качестве исключения можно назвать сибирские траппы в районах сооружения Братской, Усть-Илимской и Богучанской гидроэлектростанций, а также песчаники юрской угленосной формации в районе Иркутской гидроэлектростанции. Кроме того, некоторые сведения имеются в монографиях, посвященных инженерной геологии территорий в пределах зон влияния сибирских водохранилищ. В опубликованной работе по Прибайкалью представлены материалы лабораторного изучения физико-механических свойств грунтов метаморфической, интрузивной и осадочной (юрские песчаники и алевролиты) формаций [9], позднее появились работы по скальным грунтам южных районов Хабаровского края, Монголии и юга Восточной Сибири [10–12].

С появлением нового объекта исследований, связанных с оценкой инженерно-геологических условий в районе Албазинского месторождения твердых полезных ископаемых на севере Хабаровского края, задача изучения скальных грунтов заняла одно из ведущих мест в планах работ Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН (г. Иркутск), при этом была разработана и реализована комплексная методическая схема.

В качестве небольшого отступления обратимся к некоторым событиям. Известно, что в 1984 г. под редакцией Е. М. Сергеева было опубликовано методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород (скальных грунтов), в котором кратко описаны оптический, электронно-микроскопический и ультразвуковой методы их изучения². С помо-

¹ Ломтадзе В. Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов. Л.: Недра, 1986. 272 с.

² Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / под ред. Е. М. Сергеева. В 2 т. Т. 2. Лабораторные методы. М.: Недра, 1984. 438 с.



щью оптического метода (петрографические шлифы) определялись структуры и текстуры, минеральный состав, следы деформаций отдельных кристаллов, в эффузивах – количество порфировых включений. Электронно-микроскопический метод (просвечивающий электронный микроскоп, растровый электронный микроскоп) позволял при больших увеличениях исследовать детали строения скального грунта. С помощью ультразвукового метода (метод прозвучивания образца) измерялась скорость распространения упругих продольных сейсмических волн, изменения которой определялись различными факторами – особенностями структуры и текстуры, характером контактов между зернами, минеральным составом и другими. Но указанное пособие появилось почти сорок лет назад. Тем не менее совсем недавно, а именно 26 мая 2022 г., на заседании диссертационного совета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова состоялась защита докторской диссертации «Формирование инженерно-геологических особенностей гидротермально-метасоматических пород (на примере Курило-Камчатской вулканической дуги) Юлии Владимировны Фроловой по специальности 1.6.7 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение». Кстати, научным руководителем кандидатской диссертации соискателя была профессор Московского государственного университета Галина Андреевна Голодковская – одна из первых исследователей инженерно-геологических особенностей скальных грунтов [13, 14].

Таким образом, в настоящее время специалисты «повернулись лицом» к проблеме инженерной геологии скальных грунтов и их массивов.

Материалы и методы исследования

В рамках представленного исследования объектом изучения явились скальные грунты Албазинского месторождения на севере Хабаровского края. На первом этапе исследований проводилось составление коллекции образцов различных петрографических типов грунтов определенных геологических формаций, которые отбирались из бортов карьера,

далее выполнялся комплекс лабораторных работ по разработанной методической схеме.

В ходе данной работы для анализа скальных грунтов был выбран тот же путь, что представлен в пособии 1984 г., только главную роль в нем исполнял классический оптический метод, а для определения «сейсмической скорости» (условное название скорости распространения продольной сейсмической волны в образце V_p , м/с) применялся специальный прибор, а также два метода прозвучивания – поверхностное и сквозное. Кроме «сейсмической скорости» авторами определялись пределы прочности образца (сжатие и растяжение), его плотность и степень водопоглощения. Совмещение указанной информации позволяет применить программу кластерного анализа для количественной оценки взаимосвязей между изученными признаками в рамках составленной коллекции, которая представляет основные петрографические типы скальных грунтов геологических формаций Албазинского месторождения. Остается добавить, что в настоящее время при инженерно-геологических изысканиях или специальных тематических работах обычно отсутствует первый пункт указанной методической схемы – изготовление, описание, фото и анализ петрографических шлифов.

В Институте земной коры СО РАН выполнялось визуальное описание образцов коллекции (№ 1–15); в специальной мастерской из каждого образца изготавливались шлифы, осуществлялось их описание, фотографирование и проводился детальный анализ различных признаков и особенностей. Затем с помощью прибора «Пульсар-2.2: измерение времени и скорости распространения ультразвука» в образцах измерялись скорости распространения продольных сейсмических волн («сейсмическая скорость» V_p , м/с). Авторами применялись два способа – поверхностное и сквозное прозвучивание образца для определения «сейсмической скорости» V_{p1} и V_{p2} соответственно, при этом измерялось время прохождения ультразвука T , мкс, а также расстояние между датчиками (база) L , мм. Далее проводился расчет «сейсмической скорости» V_p по формуле $V_p = L / T$. С использованием программы кластерного анализа, которая



давно и достаточно часто применяется в рамках грунтоведческих исследований в Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии [15–18], на основе матрицы данных по сейсмическим, прочностным и физическим свойствам в программе Microsoft Excel были построены графики-дендограммы для оценки уровня их взаимосвязей.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете (г. Иркутск) по стандартной методике для некоторых образцов коллекции определялись пределы прочности при вертикальном сжатии R_c , МПа, и растяжении R_z , МПа. Для каждого образца вырезались шесть образцов-брусков, для которых определялись прочность на сжатие и растяжение, среднее значение и пределы изменения. Например, для образца № 10 (туфогенный песчаник) $R_c = 101$ МПа (среднее значение), пределы изменений – 84–121 МПа; $R_z = 24$ МПа (среднее значение), пределы изменений – 20–29 МПа. Кроме того, по стандартным методикам измерены природная плотность P_{np} , г/см³, и водопоглощение W_{ep} , %; для образцов № 1 и 5, № 3 и 6 дополнительно определены плотность минеральной части P_s , г/см³, и пористость n , %.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного исследования авторами была дана инженерно-геологическая характеристика скальных грунтов по материалам коллекции, в которой представлены образцы различных петрографических типов пород (скальных грунтов) определенных геологических формаций, распространенных в районе месторождения. В геологическом разрезе они присутствуют в составе двух структурных этажей. Нижний этаж представлен нижнеюрской метаморфической формацией (метапесчаники, сланцы, метасоматиты), верхний – эфузивной формацией нижнего мела – поздней юры (андезиты, андезиты-базальты, базальты, дакиты, спилиты) и интрузивной формацией нижнего мела (гранодиориты, гранит-порфиры).

Коллекция образцов скальных грунтов не предназначается для статистических обобщений, поскольку при помощи нее решается дру-

гая задача – на примере представителей перечисленных геологических формаций в соответствии с предложенной методической схемой собрать следующую информацию: визуальное описание образцов; изготовление и описание петрографических шлифов (исследуются текстурно-структурные особенности, минеральный состав и признаки процессов метаморфизма); измерение методами поверхностного и сквозного прозвучивания «сейсмической скорости» (V_{p1} и V_{p2} , м/с, соответственно); определение прочности при вертикальном сжатии R_c , МПа, и растяжении R_z , МПа; определение природной плотности P_{np} , г/см³, и водопоглощения W_{ep} , %.

На основе полученной информации выполняется сравнительный анализ образцов с различными значениями «сейсмической скорости» и прочности, выясняются причины этих различий, а также проводится количественная оценка взаимосвязей показателей с помощью программы кластерного анализа.

Сравнительный анализ образцов № 1 и 5. Образец № 1 – дацитовый порфир (эфузивная формация нижнего мела – поздней юры). Шлиф представлен на рис. 1. Структура образца порфировая, преобладают зерна размером 0,1–0,25 мм, порфиры достигают 0,6–4 мм; текстура пятнистая. Минеральный состав образца имеет следующий вид: главные компоненты – плагиоклазы (39 %), кварц (18 %), калишпаты (19 %); второстепенные – кальцит (11 %), серицит (10 %), рудные (3 %). Основная масса скрытокристаллическая (фельзитовая), имеются крупные порфировые включения полевых шпатов и кварца, отмечаются признаки аллотриоморфной структуры (минералы не имеют кристаллографических четких очертаний). Полевые шпаты интенсивно кальцитизированы, серицитизированы. Кварц-полевошпатовые фельзитовые и аллотриоморфные агрегаты располагаются неравномерно: мелкие зерна реликтового рудного минерала замещены лейкоксеном. Слабо развиты признаки процессов катаклаза; признаки бластогенеза (перекристаллизация в твердом состоянии) проявлены в виде серицитизации и кальцитизации.

С целью измерения «сейсмической скорости» V_{p2} проведено сквозное прозвучивание.

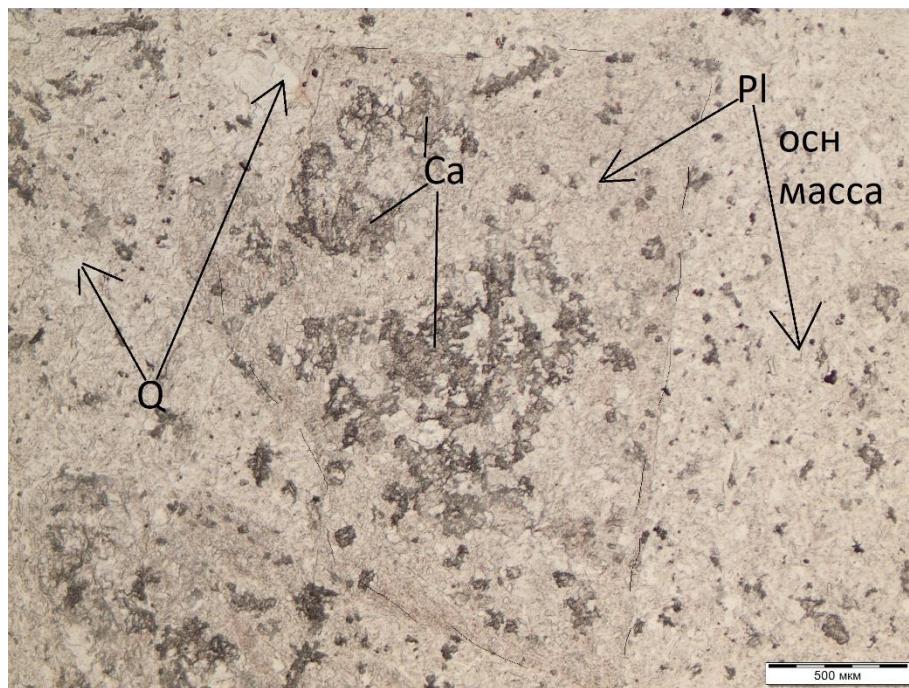


Рис. 1. Образец № 1 – дацитовый порфир
Fig. 1. Sample no. 1 – dacite porphyry

При $T = 13,8$ мкс и $L = 52$ мм $V_{p2} = 3768$ м/с.

При $T = 10,8$ мкс и $L = 45$ мм $V_{p2} = 4166$ м/с.

Среднее значение $V_{p2} = 4070$ м/с ($n = 2$ %).

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{pp} = 2,65$ г/см³; $P_s = 2,69$ г/см³; $n = 1,4$ %; $W_{вл} = 0,53$ %.

Образец № 5 – метапесчаник (метаморфическая формация нижней юры). Шлиф представлен на рис. 2. Структура псаммитовая, размер зерен – 0,1–0,7 мм, цемент глинистый, базальний и базально-поровый (до 16 %); текстура неясно ориентированная. Минеральный состав образца имеет следующий вид: основные компоненты – полевые шпаты (38 %), кварц (18 %); второстепенные – кальцит, рудные, биотит, серицит. Зерна минералов корродированные, угловатые, края изъедены глинистым цементом; встречаются деформированные и хлоритизированные обломки биотита; межзерновые пространства заполняют ксеноморфные формы рудного минерала, по микротрешинкам наблюдается ксеноморфный кальцит. Кроме указанных минералов в образце в большом количестве присутствуют обломки пород (до 29 %) – алевролиты, дациты, аргиллиты. Влияние метаморфизма проявляется в виде окварцевания и кальцитизации; отмечаются признаки влияния дислокационного метаморфизма – обломки кварца

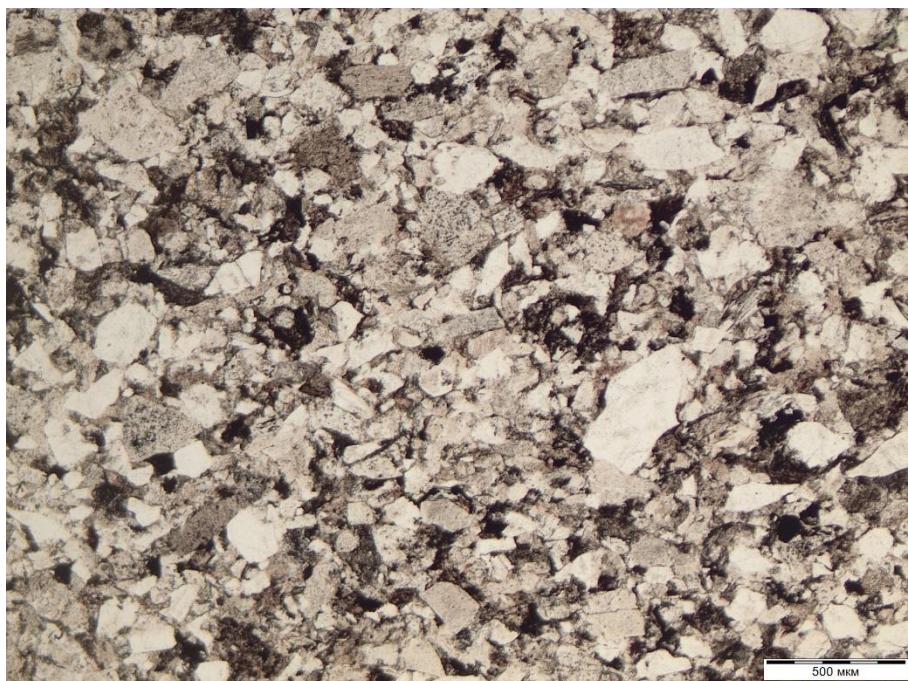
сдавлены, имеют волнистое погасание, кроме того, пористость грунта ничтожна – 0,2 %, водопоглощение, соответственно, 0,1 %. Интенсивного раздробления зерен (кластогенный процесс) не наблюдается.

С целью измерения «сейсмической скорости» V_{p2} и V_{p1} выполнены сквозное и поверхностное прозвучивания. В первом случае V_{p1} составила 4800 и 5000 м/с; среднее значение – 4900 м/с. Во втором случае получены следующие результаты: при $T = 19,6$ мкс и $L = 120$ мм $V_{p1} = 6122$ м/с; при $T = 21,1$ мкс и $L = 120$ мм $V_{p1} = 5970$ м/с; при $T = 19,7$ мкс и $L = 120$ мм $V_{p1} = 6091$ м/с; среднее значение: $V_{p1} = 6061$ м/с.

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{pp} = 2,65$ г/см³; $P_s = 2,68$ г/см³; $n = 0,2$ %; $W_{вл} = 0,1$ %.

При поверхностном прозвучивании «сейсмическая скорость» оказалась больше, чем при сквозном: считается коэффициент анизотропии – $K^1_{an} = V_{p1} / V_{p2} = 6061 / 4900 = 1,24$.

Из практики замеров «сейсмической скорости» как в скальных обнажениях, так и в достаточно больших образцах известно, что поверхностное прозвучивание представляет более надежные результаты по сравнению со способом сквозного измерения. По данным коллекции (образцы № 5–11) зафиксированы



*Рис. 2. Образец № 5 – метапесчаник
Fig. 2. Sample no. 5 – metasandstone*

коэффициенты анизотропии $K_{an}^1 = 1,13\text{--}1,24$. Почему при поверхностном прозвучивании «сейсмическая скорость» возрастает? Наши предположения заключаются в следующем. Вероятнее всего, в процессе поверхностного прозвучивания при прохождении сейсмической волны участвует вся масса образца. При сквозном прозвучивании волна пробегает определенный путь, где можно встретить различные «отрицательные особенности» (своебразные препятствия) – микротреции, вторичные образования, «порфиры», деформированные зерна или кристаллы, что способствует снижению измеряемой «скорости». Кроме того, анизотропия скорости распространения продольной сейсмической волны зависит от наличия в образце слоистости – измерения, выполненные параллельно слоистости (или трещине), увеличивают «сейсмическую скорость» как при сквозном, так и поверхностном прозвучивании.

Результаты сравнительного анализа лабораторных исследований образцов № 1 и 5 заключаются в следующем. При сопоставлении установлено, что скорость распространения продольных сейсмических волн («сейсмическая скорость») в метапесчанике (образец № 5) оказалась выше (максимальное значение – 6061 м/с) по сравнению с аналогичной скоро-

стью в даките (образец № 1, максимальное значение – 4070 м/с). Плотность этих образцов почти не различается ($2,65\text{--}2,69 \text{ г}/\text{см}^3$), но имеются четкие различия по пористости: в даките – 1,4 %, в песчанике – 0,2 %. Можно предположить, что пористость в скальных грунтах имеет большее влияние на сейсмические свойства, чем их плотность, поскольку она связана с признаками, которые можно установить только на микроуровне (в шлифе).

В отчете Института горного дела ДВО РАН (г. Хабаровск) от 2021 г. по результатам статистической обработки данных о пористости шести петрографических типов скальных грунтов месторождения Албазино (Албазинское) отмечалась наибольшая степень ее изменчивости – коэффициент вариации достигает в ряде случаев 88–94 % (для плотности этот показатель составляет менее 3 %). Возможно, появление образцов с повышенными значениями пористости связано с некоторым разуплотнением, также причина может крыться в петрографической информации, которая в отчете отсутствует. Именно эта информация имеется для образцов № 1 (эффузивная формация) и № 5 (метаморфическая формация).

Дакит (образец № 1) имеет порфировую (разнородную) структуру и пятнистую текстуру,



среди главных минералов преобладают пла-гиоклазы и калишпаты (в сумме 58 %), присутствуют неравномерно распределенные кварц-полевошпатовые фельзитовые агрегаты в скрытокристаллической массе; отмечаются признаки процессов бластогенеза (перекристаллизация в твердом состоянии) в виде кальцитизации – серицитизации и слабого дислокационного метаморфизма (иногда отмечается микротрециноватость зерен); пористость – 1,4 %. Перечисленные признаки явились причиной пониженной «сейсмической скорости»: $V_{p2} = 4070$ м/с.

Метапесчаник (образец № 5) имеет псаммитовую (однородную) структуру, среди главных минералов присутствуют серицитизированные плахиоклазы и пелитизированные калишпаты, много обломков пород; имеются сдавленные зерна кварца (для них характерно волнистое погасание) и деформированные зерна биотита, что связано с интенсивным влиянием высокого давления; при метаморфизме проявлено окварцевание и кальцитизация; пористость – 0,2 %. Перечисленные признаки явились причиной повышенной «сейсмической скорости»: $V_{p1} = 6061$ м/с.

Таким образом, главные причины указанных различий по сейсмическим свойствам связаны с признаками структуры и текстуры, состава, процессами кластогенеза и бластогенеза (образцы № 1, 5).

Сравнительный анализ образцов № 3 и 6. Образец № 3 – метапесчаник (метаморфическая формация нижней юры). Шлиф представлен на рис. 3. Структура метапесчаника псаммитовая мелкозернистая (0,1–0,25 мм); текстура неясно ориентированная. Минеральный состав образца имеет следующий вид: главные компоненты – полевые шпаты (32 %), кварц (16 %); второстепенные – биотит (3 %), серицит (4 %), кальцит (4 %), рудные (5 %); ак-цессорные – циркон, лейкоксен (единичные зерна); вторичные – хлорит, серицит, кальцит, гидроокислы железа, кварц. Среди зерен в метапесчанике встречается большое количество обломков пород (до 30 %), представленных аргиллитом, алевролитом, гранитоидами, эфузивами кислого состава. Цемент метапесчаника глинистый базально-поровый (около 20 %); обломки угловатые, по краям и по трещинам изъедены глинистым цементом. Зерна полевых шпатов трещиноватые, при этом плахиоклазы серицитизированы, калишпаты интенсивно пелитизированы. Обломки биотита деформированы (смяты), частично хлоритизированы. Рудные заполняют микротрециники, в виде мелких зерен присутствуют среди основной массы. В порах между обломками отмечается ксеноморфный кальцит. Метапесчаник интенсивно катаклизирован, микротрециники заполнены гидроокислами железа. Метагенетические изменения в песчанике проявлены в виде катаклаза, серицитизации, кальцитизации и окварцевания (прожилки кварца – 0,03 мм).

Измерение «сейсмической скорости» V_{p2} выполнено в одном варианте сквозного прозвучивания. При $T = 11,3$ мкс и $L = 47$ мм $V_{p2} = 4159$ м/с.

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{pr} = 2,65$ г/см³; $P_s = 2,71$ г/см³; $n = 2,2$ %; $W_{sp} = 0,82$ %.

Образец № 6 – метапесчаник (метаморфическая формация нижней юры). Шлиф представлен на рис. 4. Структура метапесчаника псаммитовая мелкозернистая (0,1–0,25 мм); текстура неясно ориентированная. Минеральный состав образца имеет следующий вид: главные компоненты – полевые шпаты (32 %), кварц (16 %); второстепенные – биотит (3 %), серицит (4 %), кальцит (4 %), рудные (5 %); ак-цессорные – циркон, лейкоксен (единичные зерна); вторичные – хлорит, серицит, кальцит, гидроокислы железа, кварц. Среди зерен в метапесчанике встречается большое количество обломков пород (до 30 %), представленных аргиллитом, алевролитом, гранитоидами, эфузивами кислого состава. Цемент метапесчаника глинистый базально-поровый (около 20 %); обломки угловатые, по краям и по трещинам изъедены глинистым цементом. Зерна полевых шпатов трещиноватые, при этом плахиоклазы серицитизированы, калишпаты интенсивно пелитизированы. Обломки биотита деформированы (смяты), частично хлоритизированы. Рудные заполняют микротрециники, в виде мелких зерен присутствуют среди основной массы. В порах между обломками отмечается ксеноморфный кальцит. Метапесчаник интенсивно катаклизирован, мик-



ротрецинки заполнены гидроокислами железа. Метагенетические изменения в песчанике проявлены в виде катаклиза, серицитизации, кальцитизации и окварцевания (прожилки кварца – 0,03 мм).

Измерение «сейсмической скорости» V_{p1} выполнено в варианте поверхностного прозвучивания. При $T = 12,2$ мкс и $L = 53$ мм $V_{p1} = 4300$ м/с. При $T = 20,5$ мкс и $L = 78$ мм $V_{p1} =$

3800 м/с. При $T = 12,9$ мкс и $L = 56$ мм $V_{p1} = 4300$ м/с. Рассчитывается среднее значение $V_{p1} = 4133$ м/с ($n = 3$ %).

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{pp} = 2,72$ г/см³; $P_s = 2,75$ г/см³; $n = 1,2$ %; $W_{sp} = 0,43$ %.

Результаты сравнительного анализа лабораторных исследований образцов № 3 и 6 заключаются в следующем. При сопоставлении

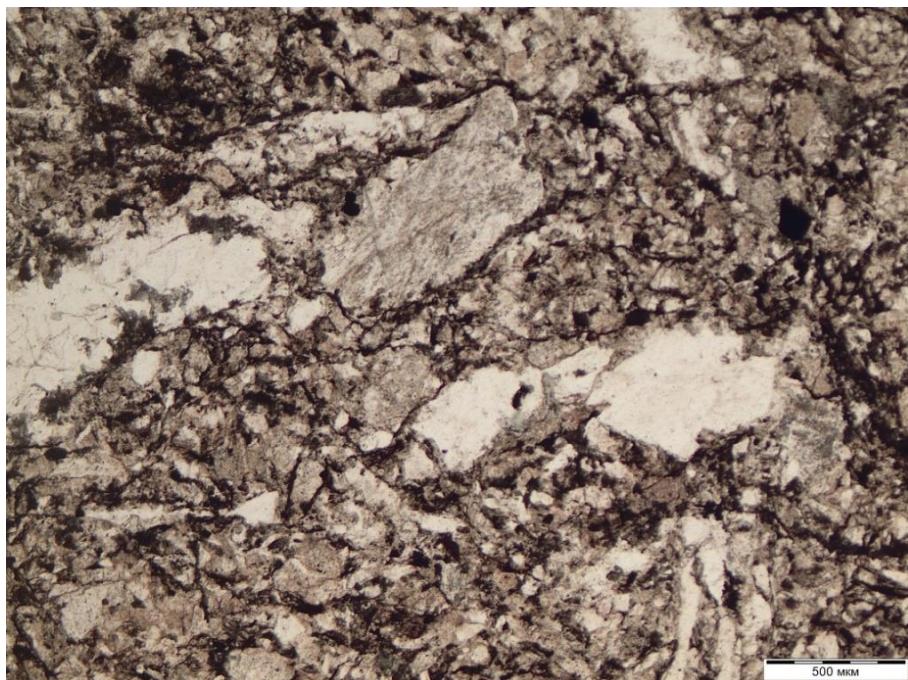


Рис. 3. Образец № 3 – метапесчаник
Fig. 3. Sample no. 3 – metasandstone

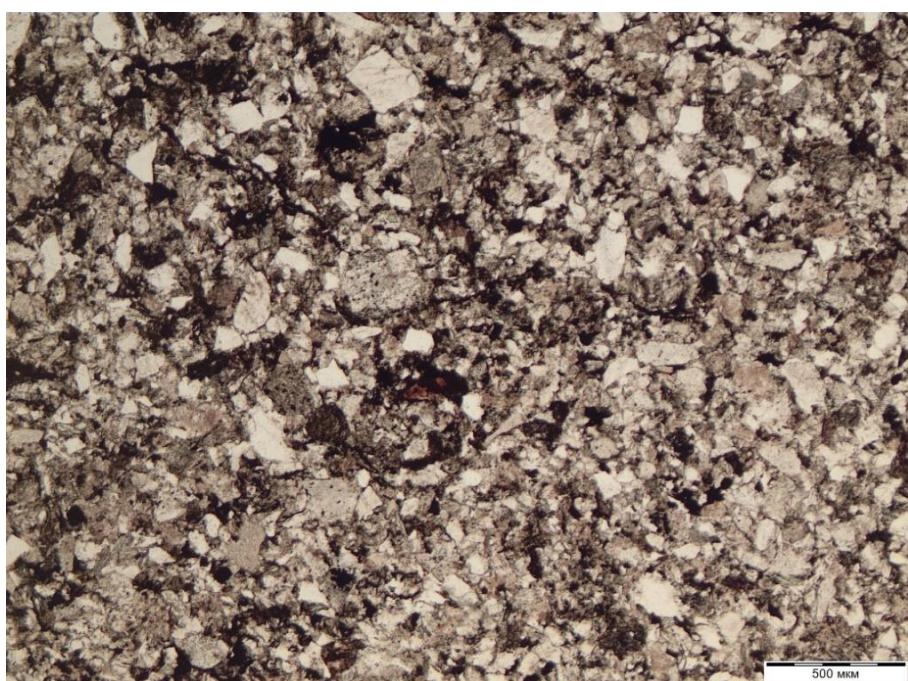


Рис. 4. Образец № 6 – метапесчаник
Fig. 4. Sample no. 6 – metasandstone



образцов установлено, что они характеризуются пониженными значениями «сейсмической скорости» ($V_{p2} = 4159$, $V_{p1} = 4133$ м/с), при этом оба образца представлены метапесчаниками с относительно однородной псаммитовой средне-мелкозернистой структурой. В то же время на микроуровне (шлифы) выявлено, что исследованные метапесчаники интенсивно катализированы (см. рис. 3 – образец № 3, рис. 4 – образец № 6). Таким образом, в данном примере четко выражено влияние на сейсмические свойства скальных грунтов процессов катализаза, структура отступает на второй план.

Сравнительный анализ образцов № 9 и 11. В кратком варианте выполнен сравнительный анализ образцов № 9 (андезитовый порфириит) и № 11 (метасоматит). В первом случае (андезитовый порфириит) «сейсмическая скорость» $V_{p1} = 5192$, $V_{p2} = 4393$ м/с, во втором (метасоматит) – соответственно 4197 и 3513 м/с. Для этой пары имеются данные по прочности: андезитовый порфириит характеризуется повышенной прочностью при сжатии и растяжении (101–24 МПа), метасоматит – пониженной (40–7 МПа). Причиной различий также являются признаки, установленные на микроуровне. Повышенные показатели «сейсмической скорости» и прочности андезитового порфириита можно объяснить слабым развитием процессов катализаза и одновременно относительно однородной реликтовой порфировой структурой; пониженные показатели «сейсмической скорости» и прочности ме-

тасоматита, вероятнее всего, связаны с разнородным минеральным составом (главные минералы – хлорит, рудные, кальцит, кварц, руксит) и характерной метасоматической (вторичной) катализированной структурой.

Оценка взаимосвязей показателей сейсмических, прочностных, физических свойств скальных грунтов (программа кластерного анализа R-типа). Оценка взаимосвязей показателей указанных свойств скальных грунтов коллекции проводилась на примере группы из шести образцов, для которых определялись пределы и средние значения прочности на вертикальное сжатие (R_c , МПа) и растяжение (R_z , МПа), средние значения «сейсмической скорости» (V_{p1} , V_{p2} м/с), а также природная плотность (P_{np} , г/см³) для конкретного образца.

В таблице представлена матрица данных, с помощью которой в программе Microsoft Excel были построены различные варианты графиков-дендрограмм по программе кластерного анализа R-типа. Каждый образец таблицы представлен петрографическим типом породы (грунта): 9 – андезитовый порфириит, 10 – туфогенный песчаник, 11 – метасоматит, 12 – андезитовый порфириит, 13 – андезит, 14 – спилит.

Оценка взаимосвязей между показателями оценивается по коэффициенту корреляции (горизонтальная ось на графике-дендрограмме): при коэффициенте более 0,7 связи между показателями и кластерами (группами различных показателей) считаются существен-

Прочность, «сейсмическая скорость» и плотность скальных грунтов

(коллекция, образцы № 9–14)

Strength, “seismic velocity” and density of rocky soils (collection, samples no. 9–14)

Номер образца (коллекция)	Показатель						
	R_c (пр)	R_c (ср), $n = 6$	R_z (пр)	R_z (ср), $n = 6$	V_{p1} (ср)	V_{p2} (ср)	P_{np}
9	93–121	101	20–29	24	5192	4393	2,9
10	93–133	115	15–36	31	5560	4627	2,58
11	34–49	41	5–8	7	4197	3513	3,5
12	71–117	93	11–31	19	4554	4002	2,58
13	59–107	86	15–24	19	4734	4552	2,5
14	53–102	67	9–20	14	5370	5512	2,96

Примечание. R_c , R_z – прочность на сжатие и растяжение соответственно, МПа; V_{p1} , V_{p2} – «сейсмическая скорость» при поверхностном и сквозном прозвучивании соответственно, м/с; P_{np} – природная плотность для конкретного образца, г/см³; n – пористость, %. Пр – пределы изменений, ср – средние значения.

Note. R_c , R_z – compressive and tensile strength, respectively, MPa; V_{p1} , V_{p2} – “seismic velocity” at surface and through sounding, respectively, m/s; P_{np} – natural density for a particular sample, g/cm³; n – porosity, %. Пр – variation limits, ср – average values.



ными, если коэффициент менее 0,4 – слабыми; при коэффициенте в пределах 0,4–0,7 связи среднего уровня (их можно назвать заметными).

Первый вариант графика включает средние значения прочности и «сейсмической скорости» (рис. 5).

Выделены два кластера признаков: первый включает очень тесно связанные показатели прочности (коэффициент корреляции близок к единице, тем не менее всегда $R_c > R_z$); второй объединяет «сейсмические скорости», но коэффициент корреляции между ними снижается до 0,8 (также соблюдается неравенство $V_{p1} > V_{p2}$). Связь между этими кластерами заметная, но не является существенной (коэффициент корреляции – 0,48).

При построении второго варианта графика в число признаков добавляется природная плотность (рис. 6).

Выделены два кластера признаков, которые между собой не имеют существенной связи (коэффициент корреляции – 0,3). Уровень взаимосвязи плотности и «сейсмической скорости» (второй кластер) – менее 0,7 (коэффициент корреляции – 0,62). Прочность (R_c , R_z) не имеет контактов с плотностью и «сейсмической скоростью» (коэффициент корреляции – 0,3). Значит, имеются другие факторы

воздействия, которые, вероятнее всего, существуют на микроуровне.

Кроме того, при использовании фондовых материалов по Албазинскому месторождению была также установлена «аномальная» зависимость, которая заключалась в том, что природная плотность скальных грунтов (метапесчаников и дакитов) не влияет существенно на их прочность, поскольку коэффициент корреляции между этими признаками – менее 0,4 (0,27) [19].

Аналогичная «аномалия» была выявлена при изучении протерозойских песчаников из района Удоканского месторождения, для которых ведущими факторами оказались особенности их структуры и текстуры, установленные при изучении петрографических шлифов [20].

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Оценка сейсмических свойств скальных грунтов (определение скорости распространения продольных сейсмических волн в образце методом прозвучивания – условное название «сейсмическая скорость») зависит от комплекса факторов, которые определяются многочисленными признаками петрографического

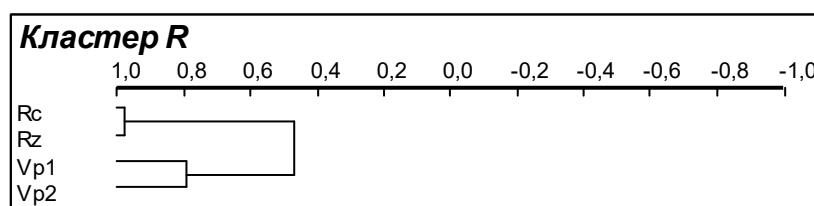


Рис. 5. Взаимосвязи прочности и «сейсмической скорости»

Горизонтальная ось – коэффициент корреляции

Fig. 5. Correlation of strength and “seismic velocity”

The horizontal axis is the correlation coefficient

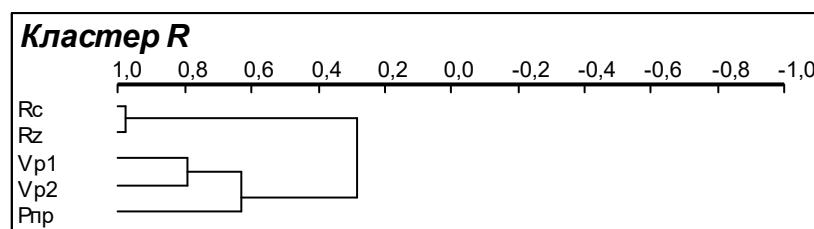


Рис. 6. Взаимосвязи прочности, «сейсмической скорости» и природной плотности

Горизонтальная ось – коэффициент корреляции

Fig. 6. Correlations of strength, “seismic velocity” and natural density

The horizontal axis is the correlation coefficient



характера в условиях разнообразного сочетания положительного и отрицательного влияния на величину сейсмического показателя. К этим признакам относятся типы структуры и текстуры, образование агрегатов различного состава, степень развития процессов катаклаза (дробление зерен и кристаллов) и бластогенеза (вторичные преобразования вещества в твердом состоянии), интенсивное сдавливание при дислокационном метаморфизме, особый состав главных минералов.

2. Главными факторами «сейсмической скорости» скальных грунтов, вероятнее всего, оказываются признаки, которые необходимо фиксировать на микроуровне (современное направление при инженерно-геологическом изучении скальных грунтов и скальных массивов). В нашем случае этот факт установлен при сравнении образцов с разнообразными

признаками, связанными с кластогенезом, бластогенезом и другими воздействиями метаморфических изменений, которые были установлены с помощью оптического метода.

3. Полученные результаты дают повод рекомендовать включить в методику инженерно-геологических и инженерно-сейсмологических исследований показатель «петрографический кластер». Следует отметить, что ввиду незначительного количества образцов, принадлежащих к одному объекту (месторождение Албазинское), полученные результаты являются предварительными, в связи с чем требуется дальнейшее продолжение испытаний, а также сопоставление и сравнительный анализ их результатов с результатами аналогичных исследований скальных петрографических разновидностей других регионов.

Список источников

1. Marinos P., Noek E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2001. Vol. 60. Iss. 2. P. 85–92. <https://doi.org/10.1007/s100640000090>.
2. Aydan Ö., Ulusay R., Tokashiki N. Rock mass quality rating (RMQR) system and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses // Engineering Geology for Society and Territory. 2015. Vol. 6. P. 769–772. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_137.
3. Barton N. R., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics. 1974. Vol. 6. Iss. 4. P. 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
4. Noek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. Vol. 34. Iss. 8. P. 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
5. Абатурова И. В. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 226 с.
6. Фролова Ю. В. Современные подходы к изучению скальных грунтов и их массивов (обзор по материалам XII Конгресса МАИГ-2014) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 6. С. 553–560.
7. Ладыгин В. М., Фролова Ю. В., Спиридов Э. М. Формирование физико-механических свойств эфузивных пород // Инженерная геология. 2016. № 3. С. 36–45.
8. Ладыгин В. М., Фролова Ю. В., Спиридов Э. М. О явлении аномально низких значений скоростей про-
- дольных волн современных базальтоидов // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о земле. 2018. № 1. С. 20–31.
9. Инженерная геология Прибайкалья / отв. ред. Г. Б. Пальшин. М.: Наука, 1968. 186 с.
10. Даммер А. Э., Квашук С. В. Инженерно-геологические условия южной части Хабаровского края: монография. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. 121 с.
11. Ряшенко Т. Г., Данилова Т. Ф., Нетесова Г. Е., Малышева Л. В., Акулова В. В. Инженерно-геологическая оценка мезо-кайнозойских отложений (Восточная Сибирь и Монголия). Новосибирск: Наука, 1992. 118 с.
12. Ряшенко Т. Г., Акулова В. В. Грунты юга Восточной Сибири и Монголии: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 154 с.
13. Голодковская Г. А. Изучение геологических формаций при региональных инженерно-геологических исследованиях // Советская геология. 1964. № 8. С. 149–156.
14. Фролова Ю. В., Голодковская Г. А., Ладыгин В. М., Рычагов С. Н. О природе инженерно-геологических свойств гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 1999. № 3. С. 36–42.
15. Ряшенко Т. Г. Опыт применения кластер-анализа при инженерно-геологических исследованиях // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 108–114.
16. Данилов Б. С. Кластерный анализ в EXCEL // Строение литосферы и геодинамика: материалы науч. конф. Иркутск, 2001. С. 18–19.
17. Ряшенко Т. Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь): монография. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.
18. Ряшенко Т. Г., Вашестюк Ю. В., Гринь Н. Н. Метод



«Микроструктура» в практике региональных инженерно-геологических исследований лесовых и глинистых грунтов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. 130 с.

19. Ряшенко Т. Г., Маслов Е. А. Опыт инженерно-геологической оценки скальных грунтов (Албазинское месторождение на севере Хабаровского края) // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии:

труды Междунар. науч. конф. М., 2021. С. 268–272.

20. Ряшенко Т. Г., Тирских С. А., Корнилова Т. А., Брыжак Е. В. Комплексная инженерно-геологическая оценка протерозойских песчаников (строительная площадка в районе Удокана) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. № 3. С. 51–58. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-3-51-58>.

References

1. Marinos P., Noek E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2001;60(2):85-92. <https://doi.org/10.1007/s100640000090>.
2. Aydan Ö., Ulusay R., Tokashiki N. Rock mass quality rating (RMQR) system and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Engineering Geology for Society and Territory*. 2015;6:769-772. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_137.
3. Barton N. R., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 1974;6(4):189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
4. Noek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997;34(8):1165-1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
5. Abaturova I. V. *Evaluation and forecast of engineering-geological conditions of solid mineral deposits in folded mountain areas*. Ekaterinburg: Ural State Mining University, 2011. 226 p. (In Russ.).
6. Frolova Yu. V. Current approaches to the study of rock mechanics and rock massifs (overview of XII IAEG congress proceedings). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2015;6:553-560. (In Russ.).
7. Ladygin V. M., Frolova Yu. V., Spiridonov E. M. Formation of physical mechanical properties of effusive rocks. *Inzhenernaya geologiya = Engineering Geology World*. 2016;3:36-45. (In Russ.).
8. Ladygin V. M., Frolova J. V., Spiridonov E. M. Abnormally low velocity values of longitudinal waves in modern basaltoids. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr"*. Серия: *Nauki o Zemle* = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". *Earth Sciences*. 2018;1:20-31.
9. Pal'shin G. B. *Engineering geology of the Baikal region*. Moscow: Nauka; 1968. 186 p. (In Russ.).
10. Dammer A. E., Kvashuk S. V. *Geotechnical conditions of the southern part of the Khabarovsk Territory*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2001. 121 p. (In Russ.).
11. Ryashchenko T. G., Danilova T. F., Netesova G. E., Malysheva L. V., Akulova V. V. *Geotechnical assessment of Meso-Cenozoic deposits (Eastern Siberia and Mongolia)*. Novosibirsk: Nauka; 1992. 118 p. (In Russ.).
12. Ryashchenko T. G., Akulova V. V. *Soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1998. 154 p. (In Russ.).
13. Golodkovskaya G. A. Study of geological formations in regional engineering and geological studies. *Sovetskaya geologiya*. 1964;8:149-156. (In Russ.).
14. Frolova Yu. V., Golodkovskaya G. A., Ladygin V. M., Rychagov S. N. On the nature of engineering-geological properties of hydrothermal metasomatic rocks of the Kurils-Kamchatka region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1999;3:36-42. (In Russ.).
15. Ryashchenko T. G. Cluster analysis experience in the engineering and geological research. *Inzhenernaya geologiya = Engineering Geology World*. 1980;3:108-114. (In Russ.).
16. Danilov B. S. Cluster analysis in EXCEL. In: *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy nauch. konf. = Lithospheric structure and geodynamics: proceedings of the scientific conference*. Irkutsk; 2001, p. 18-19. (In Russ.).
17. Ryashchenko T. G. *Regional soil science (Eastern Siberia)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2010. 287 p. (In Russ.).
18. Ryashchenko T. G., Vashestyuk Yu. V., Grin' N. N. *Microstructure method in practical regional engineering and geological studies of loess and clay soils*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2021. 130 p. (In Russ.).
19. Ryashchenko T. G., Maslov E. A. The experience of engineering and geological assessment of rocky soils (Albazinskoye deposit in the north of the Khabarovsk region). *Novye idei i teoretičeskie aspekty inzhenernoi geologii: trudy Mezhdunar. nauch. konf. = New ideas and theoretical aspects of engineering geology: proceedings of the International scientific conference*. Moscow; 2021, p. 268-272. (In Russ.).
20. Ryashchenko T. G., Tyrshih S. A., Kornilova T. A., Bryzhak E. V. Integrated engineering geological evaluation of Proterozoic sandstones: a case study of the construction site near the town of Udokan. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2015;(3):51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-3-51-58>.



Информация об авторах / Information about the authors



Ряшченко Тамара Гурьевна,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ryashenk@crust.irk.ru.

Tamara G. Ryashchenko,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Leading Researcher at the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
ryashenk@crust.irk.ru.



Маслов Егор Александрович,
аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
MaslovEA@polymetal.ru.

Egor A. Maslov,
Postgraduate Student,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
MaslovEA@polymetal.ru.



Брыжак Евгений Вадимович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
bryzhak@crust.irk.ru.

Evgeny V. Bryzhak,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
bryzhak@crust.irk.ru.



Корнилова Татьяна Александровна,
ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
kornilova@crust.irk.ru.

Tatiana A. Kornilova,
Leading Engineer of the Laboratory of Oil and Gas Geology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
kornilova@crust.irk.ru.



Вашестюк Юлия Владимировна,
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
vashestyuk_yv@istu.edu.



Yulia V. Vashestyuk,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Associate Professor at the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
vashestyuk_yv@istu.edu.



Болотнев Александр Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
технический руководитель Лаборатории геомеханики и физики горных пород,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
abolotnev@mail.ru.

Alexander Yu. Bolotnev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development,
Technical Director at the Laboratory of Geomechanics and Rock Physics,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
abolotnev@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 25.03.2022; одобрена после рецензирования 28.04.2022; принятая к публикации 30.05.2022.

The article was submitted 25.03.2022; approved after reviewing 28.04.2022; accepted for publication 30.05.2022.



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- 25.00.22. Геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки);
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические науки);
- 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 геологоразведочных 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;
 - акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
 - сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала



(русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 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 текста рукописи рисунки должны быть предоставлены отдельными файлами. Векторная графика 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 JPEG (сохранение в формате 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 представляются с расширением .xis (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, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование



журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и 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. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор Раиса Моисеевна Лобацкая, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Сергей Юрьевич Красноштанов, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo_info@istu.edu

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 (3952) 405108, 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)

Елена Михайловна Курчевская, Марина Владиславовна Яхно^b,

Аркадий Евгеньевич Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Яхно Марина Владиславовна, ymar@istu.edu

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-вкрашенные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серicitовой 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 серicitизированными, 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}NIFI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Marina V. Yakhno, ymar@istu.edu

Abstract. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore compo-



sition. 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

Фото
автора

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.

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
umar@istu.edu,
ORCID.

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
umar@istu.edu,
ORCID.

Фото
автора

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 45 № 2 (79) 2022

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 28.06.2022 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,5.
Тираж 500 экз. Зак. 103. 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