

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom 47 **№ 4** 2024
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

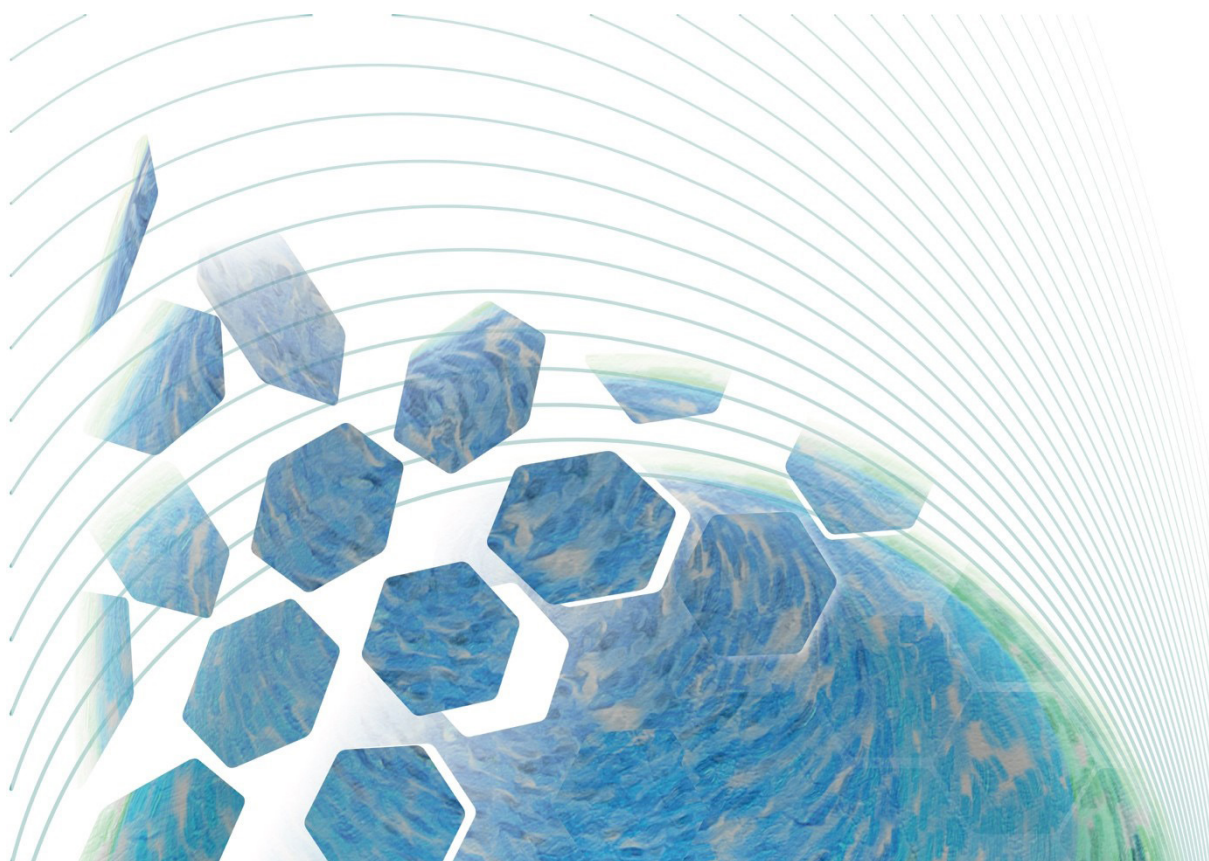
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 47 № 4 2024
Vol.

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)

Гладкозуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Скляр Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

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

Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)

Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)

Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ши Гуаньхай, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)

Чжао Цзюньмэн, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)

Чжан Юнчжань, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)

Шигин А.О., д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Семинский К.Ж., д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Тимофеева С.С., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Зелинская Е.В., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Морин А.С., д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Председатель редакционного совета:

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

Журнал «Науки о Земле и недропользование» входит в базу данных GeoRef, в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВИННИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

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

Периодичность выхода – ежеквартально

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Регистрационный номер:
ПИ № ФС77-76110 от 24 июня 2019 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Издательство:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет»
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции:

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
e-mail: nzn@istu.edu

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2024

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Chairman of the Editorial Council

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive secretary

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

The journal "Earth sciences and subsoil use" is included in the GeoRef database and current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is also included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiryak St., Yekaterinburg 620026, Russia). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

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

Publication frequency

A quarterly journal

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)
Registration No.:
ПИ no. ФС77-76110 of June 24, 2019

Founder and Publisher

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

Publishing House

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

Editorial Office

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
e-mail: nzn@istu.edu

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University", 2024



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	366
-----------------	-----

Геофизика

Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А. Газовые гидраты в Арктике: возможности и перспективы изучения электромагнитными методами	368
Поспеев А.В., Буддо И.В., Абсалямова Д.Ф. Возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе становления электромагнитного поля	381
Савченко В.А. Применение комплексной маловысотной беспилотной аэрогеофизической съемки для уточнения среднемасштабных геологических карт Бодайбинского синклинория (статья на англ. яз.)	389
Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г. Методика применения электротомографии при поиске подземных вод в условиях распространения многолетнемерзлых пород на примере Бодайбинского района Иркутской области	400
Юрьев А.А., Шелохов И.А., Буддо И.В., Рыбченко А.А. Картирование озер и бугров пучения в Арктике с использованием данных синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации с применением технологий глубокого обучения	417

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

Онамун Д.Л.А., Дмитриев А.Г. Результаты 3D сейсморазведочных работ при поисках углеводородов в Гвинейском заливе	430
Шадрин В.С., Большунов А.В., Климов В.Я. О системах контроля и телеметрии процесса колонкового бурения скважин в ледниках и подледниковых горных породах электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле	442

Геоэкология

Качор О.Л., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Первые результаты переоценки состояния окружающей среды в зоне влияния бывшего мышьякового завода в поселке городского типа Вершино-Дарасунский (Забайкальский край)	453
К сведению авторов.....	468



CONTENTS

Contents.....	367
---------------	-----

Geophysics

Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A. Arctic gas hydrates: possibilities and prospects of studying by electromagnetic methods (in Russ.).....	368
Pospeev A.V., Buddo I.V., Absalyamova D.F. Reducing starting depth in the transient electromagnetic method (in Russ.).....	381
Savchenko V.A. Using complex low-altitude unmanned aerogeophysical survey to refine medium-scale geological maps of Bodaibo synclinorium.....	389
Shoykhonova T.S., Shkirya M.S., Biryukov P.G. Methodology of using electrical tomography in groundwater exploration in permafrost conditions on example of Bodaibo district, Irkutsk region (in Russ.).....	400
Yuriev A.A., Shelokhov I.A., Buddo I.V., Rybchenko A.A. Mapping of lakes and heave mounds in the Arctic using synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar data with deep learning technologies (in Russ.).....	417

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

Onamoun D.L.A., Dmitriev A.G. Results of 3D seismic surveying for hydrocarbons in the Gulf of Guinea (in Russ.)	430
Shadrin V.S., Bolshunov A.V., Klimov V.Ya. On control and telemetry systems of borehole core drilling in glaciers and subglacial rocks with electromechanical cable-suspended drills (in Russ.)	442

Geoecology

Kachor O.L., Ikramov Z.L., Parshin A.V. First reassessment results of environment state in former arsenic plant impact zone in Vershino-Darasunsky settlement (Transbaikalia region) (in Russ.).....	453
Information for the Authors	468



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.03

EDN: QOGIZV

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380



Газовые гидраты в Арктике: возможности и перспективы изучения электромагнитными методами

© Н.В. Мисюркеева^{a✉}, И.В. Буддо^b, И.А. Шелохов^c,
А.С. Смирнов^d, А.А. Нежданов^e

^{a-c}Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^dНаучный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

^eЗападно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, Тюмень, Россия

Резюме. Месторождения нетрадиционных углеводородов – резервный источник восполнения сырьевой базы России. Существенная часть нетрадиционного газа связана с газовыми гидратами, поиск и разведка которых на сегодняшний день остается сложной задачей для геологов. Технология извлечения еще не разработана, и поисковые критерии неясны для многих объектов. Многолетняя мерзлота Западной Сибири играет ключевую роль в существовании газовых гидратов, создавая условия для их образования и обеспечивая стабильность. Геофизические исследования методом малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне совместно с анализом гидрогеологического и криогенного строения, а также результатами бурения и лабораторных экспериментов способствуют изучению мерзлоты и газогидратообразования. Целью исследования являлась оценка возможностей и перспектив изучения газовых гидратов с помощью наземной электроразведки в зоне вечной мерзлоты Арктики. Рассмотрены физико-геологические характеристики скоплений газовых гидратов, их проявление в результатах геофизических исследований. Приведены примеры проявления газовых гидратов в песчанистых отложениях тибейсалинской свиты на основе материалов электроразведки методом малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне. Интервалы возможного наличия газовых гидратов характеризуются повышенными значениями удельного электрического сопротивления до 30 Ом·м. Намечены дальнейшие пути применения геофизических исследований с целью картирования газовых гидратов в условиях Арктики.

Ключевые слова: газовые гидраты, нетрадиционные ресурсы углеводородов, мерзлота, криолитозона, нестационарные электромагнитные зондирования, Арктика

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

Для цитирования: Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А. Газовые гидраты в Арктике: возможности и перспективы изучения электромагнитными методами // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 368–380. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380>. EDN: QOGIZV.

GEOPHYSICS

Original article

Arctic gas hydrates: possibilities and prospects of studying by electromagnetic methods

© Natalya V. Misyrkееva^{a✉}, Igor V. Buddo^b, Ivan A. Shelokhov^c,
Alexander S. Smirnov^d, Aleksey A. Nezhdanov^e

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

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^dArctic Research Center, Salekhard, Russia

^eWest Siberian Research Institute of Geology and Geophysics, Tyumen, Russia

Abstract. Deposits of unconventional hydrocarbons are reserve sources of replenishment of the raw material base of Russia. A significant part of unconventional gas is associated with gas hydrates, the search and exploration of which

© Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А., 2024



today remains a complex task for geologists. The extraction technology has not been developed yet, and the search criteria are still unclear for many objects. Western Siberia permafrost plays the key role in the existence of gas hydrates, creating conditions for their formation and ensuring their stability. Geophysical studies using the shallow near-field transient electromagnetic sounding method together with the analysis of the hydrogeological and cryogenic structure, as well as the results of drilling and laboratory experiments contribute to the study of permafrost and gas hydrate formation. The purpose of the study is to assess the possibilities and prospects for studying gas hydrates using surface electrical exploration in the Arctic permafrost zone. The paper considers the physical and geological characteristics of gas hydrate accumulations and their manifestation in geophysical study results. Examples of gas hydrate manifestation in sandy deposits of the Tibeyalsinskaya formation are given based on the materials of electrical exploration using the method of shallow near-field transient electromagnetic sounding. The intervals of possible presence of gas hydrates are characterized by increased values of specific electrical resistance up to 30 Ohm·m. The application prospects of using geophysical studies for gas hydrates mapping in Arctic are outlined.

Keywords: gas hydrates, unconventional hydrocarbon resources, permafrost, cryolithozone, transient electromagnetic sounding, Arctic

Funding: The research was carried out under the topic no. 1023110300018-4-1.5.4 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Youth Laboratory of Integrated Arctic Research of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk) using the equipment of the Resource Sharing Center "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

For citation: Misurkeeva N.V., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A. Arctic gas hydrates: possibilities and prospects of studying by electromagnetic methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):368-380. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380>. EDN: QOGIZV.

Введение

Нетрадиционными считаются углеводороды, залегающие в сложных геологических условиях и требующие применения инновационных методов разведки, добычи, переработки и транспортировки. Эти ресурсы включают низкопроницаемые коллекторы, сланцевый газ, газ из угольных пластов, глубоких горизонтов, а также газовые гидраты [1].

Несмотря на лидирующие позиции России в мировой добыче углеводородов, открытые на сегодняшний день нефтегазовые месторождения активно разрабатываются уже длительное время, многие из них относятся к категории зрелых либо истощенных. Представляется, что освоение месторождений нетрадиционных ресурсов углеводородного сырья, в том числе газовых гидратов, на которые приходится значительная их часть, может решить проблему снижения ресурсного потенциала топливно-энергетического комплекса.

Газовые гидраты представляют собой твердые кристаллические вещества, с виду напоминающие лед или снег. Кристаллическая структура состоит из молекул воды с молекулами метана внутри, объем которых может достигать до 160–180 см³ на 1 см³ гидрата.

Для образования и устойчивого (стабильного) существования гидратов необходимы низкие температуры и высокое давление, по-

этому они часто встречаются в зонах вечной мерзлоты или глубоководного шельфа (глубина более 400–500 м).

По оценкам специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ресурсы газогидратов в России составляют 800–1100 трлн м³, основная их часть сосредоточена на арктическом шельфе Западной и Восточной Сибири [2, 3]. На сегодняшний день в мире обнаружено более 200 месторождений газовых гидратов [4].

Площадь распространения возможного гидратообразования на территории России и в прилегающих шельфах арктических морей составляет более 4 млн км² (по оценке ООО «Газпром ВНИИГАЗ») [4]. Глубина залегания газовых гидратов варьирует от 200 до 1000 м¹.

Длительное охлаждение разреза арктических регионов с образованием многолетнемерзлых пород (ММП) способствовало формированию необходимых условий для гидратообразования. Однако если при этом нет определенных термобарических условий, достаточного количества газа, воды, хороших пород-коллекторов, активной системы тектонических нарушений, клатраты газа не образуются [5].

Эпохи промерзания, свойства и температура ММП, термобарические, геохимические и геологические условия в пределах формиру-

¹ Газогидраты: технологии добычи и перспективы разработки. Информационная справка // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. Режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/1437.pdf> (дата обращения: 15.05.2024).



ющей криолитозоны способствовали многообразию условий залегания газовых гидратов, которые могут находиться как под мерзлыми толщами при низких положительных, так и внутри мерзлых толщ при отрицательных температурах [6, 7]. На рис. 1 схематично представлены этапы эволюции криосферы и формирования ММП центральной части Ямало-Ненецкого автономного округа в четвертичный период.

Газовые гидраты могут образовываться как из биогенного, так и из катагенетического (глубинного) газов. Одним из генезисов их возникновения считается вероятность перехода традиционных залежей углеводородов в газогидратные нетрадиционные при условии,

что на момент промерзания они попали в зону стабильности газовых гидратов либо при промерзании часть газа из традиционных залежей отжималась в локальные ловушки и за счет последующего промерзания и высоких давлений переходила в клатратное состояние [6, 7].

По данным, представленным А.Е. Воробьевым и др.², мощность газогидратных залежей определяется общей газогенерационной обстановкой, мощностью ММП и газовой залежи до промерзания. С позиции геологоразведки поиск и разведка залежей газовых гидратов до сих пор является сложной и нетривиальной задачей. Даже если появляется технология извлечения, поисковые критерии для всех подобных объектов до сих пор не ясны.

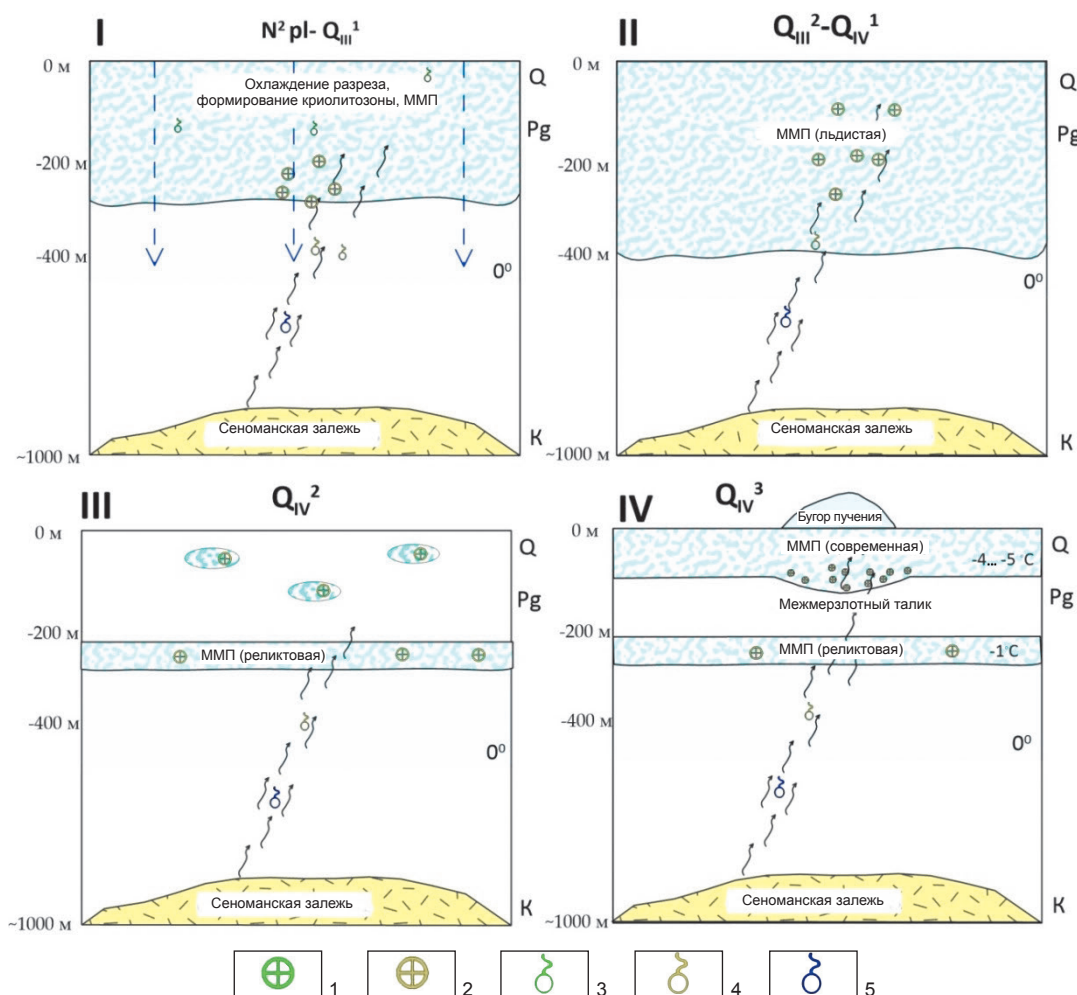


Рис. 1. История развития вечной мерзлоты на севере Западной Сибири [7]:

1–2 – газогидраты: 1 – биогенные, 2 – катагенные;

3–4 – свободный газ: 3 – биогенный, 4 – катагенный; 5 – флюиды

Fig. 1. History of permafrost development in the north of Western Siberia [7]:

1–2 – gas hydrates: 1 – biogenic, 2 – catagenic;

3–4 – free gas: 3 – biogenic, 4 – catagenic; 5 – fluids

² Воробьев А.Е., Малюков В.П. Газовые гидраты. Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды: учеб. пособие для студентов. М.: Изд-во РУДН, 2009. 292 с. EDN: UOLKXB.



При бурении в арктических регионах часто отмечаются газопроявления из толщи вечной мерзлоты (Тазовский и Гыданский полуострова, полуостров Ямал). Выбросы могут как быть низкодебитными, так и достигать промышленных масштабов. Выбросы газа связаны с разложением газовых гидратов, так как при бурении возникают резкое падение давления и растепление вблизи ствола скважины, что приводит к серьезным осложнениям и авариям на скважине.

Целью исследования являлась оценка возможностей и перспектив изучения газовых гидратов наземными электроразведочными исследованиями в зоне вечной мерзлоты Арктики. ММП Западной Сибири – один из ключевых факторов существования газогидратов. Во-первых, в совокупности с другими факторами они создают необходимые условия для гидратообразования, а во-вторых, представляют собой «покрышку», которая не позволяет углеводородам рассеиваться в атмосфере и обеспечивает условия для формирования зон стабильности газогидратов.

Очевидно, что изучение ММП является одним из важных факторов в сложной системе газогидратообразования для понимания не только генезиса формирования, но и условий и форм залегания, а также освоения газовых гидратов.

Материалы и методы исследования

На сегодняшний день основным методом поиска гидратоносных залежей является сейсморазведка, которая позволяет довольно точно картировать верхнюю и нижнюю границы гидратонасыщенных пород, а также концентрацию в них гидрата [8]. Кроме того, изучаются очаги разгрузки газа придонными профилографами. Для картирования газовых плюмов в воде используют эхолотирование.

При исследовании разгрузки газа в толщу воды используется СТД-профилирование с датчиком метана, проводятся измерения теплового потока, сейсмоакустическое профилирование для картирования очагов разгрузки газа и границы BSR (*англ.*: bottom simulating reflector – кажущаяся отражающая граница дна на сейсмических записях). Отбираются

пробы и проводятся лабораторные исследования газовых гидратов (тепловые свойства, химический анализ воды и газа и др.) [8].

Благодаря физическим свойствам гидратонасыщенных пород их можно обнаруживать по таким признакам, как высокая акустическая проводимость, низкая плотность и аномально низкая теплопроводность, пониженные водо- и газопроницаемость. Однако такому важному свойству, как электросопротивление, уделяется совсем мало внимания. В основном изучением электрического сопротивления газовых гидратов занимаются в лабораторных условиях и по результатам электрического каротажа сопротивления, полевые же наблюдения сводятся к минимуму.

Известны немногочисленные исследования электромагнитным методом CSEM (*англ.*: controlled source electromagnetic method), по результатам которых газовые гидраты фиксируются в виде аномалий повышенного сопротивления [9]. Отмечается, что гидратосодержащие морские осадки характеризуются высоким удельным электрическим сопротивлением (УЭС), сопоставимым со льдом. Газовые гидраты в морских отложениях меняют их нормальные физические свойства и могут увеличивать сопротивление пород в 2–5 и более раз [9]. Большинство известных исследований проведены в морских условиях, оценка сопротивления производилась относительно морских придонных осадков, глин и минерализованной воды³.

В большей части российской Арктики газовые гидраты залегают в зоне вечной мерзлоты, сложенной породами различного состава и солености (это предопределяет важность понимания физических свойств пород, в которых они залегают или образуются).

Физические свойства гидратов очень близки к свойствам чистого льда. Если скорости волн сжатия и сдвига (P и S) в гидрате метана могут достигать 3600 и 1900 м/с соответственно, а его плотность составляет 0,912 г/см³, то соответствующие значения для льда составляют 3890 и 1970 м/с и 0,916 г/см³ [10].

Таким образом, свойства пород, содержащих в поровом пространстве газовые гидраты, схожи с отложениями с включениями льда. Основное различие состоит в том,

³ Lee M.W., Collett T.S. A method of shaly sand correction for estimating gas hydrate saturations using downhole electrical resistivity log data: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5121. Reston, 2006 // USGS Publications Warehouse. Режим доступа: https://pubs.usgs.gov/sir/2006/5121/pdf/sir5121_508.pdf (дата обращения: 15.05.2024).



что отложения с содержанием газовых гидратов более жесткие, гидрат может воспламеняться, существовать при температурах выше 32 °F (0 °C), а для его образования и поддержания стабильности необходимо высокое поровое давление [11].

Поскольку мнения большинства исследователей сводятся к тому, что газовые гидраты контрастны по сопротивлению с вмещающей средой, актуальным становится вопрос выбора эффективного метода электроразведки для их изучения. Учитывая условия формирования газовых гидратов в зоне ММП арктических регионов, таким может быть метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), основанный на изучении процесса становления поля, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике [12]. Данный метод чувствителен к смене сопротивления, литологии и насыщения.

В условиях многолетнемерзлого разреза определяющее влияние на сопротивление оказывает переход воды из жидкой в твердую фазу, то есть лед, который является практически изолятором. Однако необходимо понимать, что промерзает не весь объем воды, насыщающей разрез, остается капиллярная влага, вымораживаются соли (при условии высокой минерализации), что также оказывает влияние на сопротивление.

Учитывая, что льдонасыщенные мерзлые породы (за счет льда) и газогидратные отложения (за счет льда и газа) обладают высоким сопротивлением, метод ЗСБ позволяет картировать подобные объекты на фоне преимущественно глинистого мезо-кайнозойского осадочного чехла, отличающегося низким сопротивлением. Существенным преимуществом является отсутствие заземления, что позволяет работать в различных природных условиях. Кроме того, данный метод обладает низкой чувствительностью к анизотропии разреза и приповерхностным неоднородностям.

Еще одним плюсом являются высокая глубинность и локальность исследований методом ЗСБ. В условиях мерзлого разреза Арктики использование малоглубинной модификации метода ЗСБ (мЗСБ) с установками небольших размеров (длина стороны генераторной петли – 100 м) и током до 30 А в источнике позволяет достигать глубинности 500 м [13]. Кроме того, ЗСБ характеризуется наивысшей вертикальной разрешающей способностью [13].

Как и для большинства методов электроразведки на постоянном токе, высокоомные слои (ММП и др.) для ЗСБ не являются экранами в силу горизонтальной поляризации поля. Данная особенность позволяет с помощью указанного метода картировать и мощный слой ММП, и высокоомные интервалы возможного наличия газовых гидратов, а также более глубоко изучать залегающие горизонты.

Целевым объектом проведенного исследования являлась верхняя часть разреза (до глубины 500 м) нефтегазового месторождения в северной части полуострова Ямал.

В орогидрографическом отношении район представляет собой низменную слегка холмистую тундровую равнину, для которой характерны обильная заозеренность и заболоченность (30 %). Абсолютные отметки высот изменяются от 0–10 до 50 м.

Гидрографическая сеть представлена реками, впадающими в Карское море, такими как Хордыяха, Таваяха, Яходыяха и др. Короткое и прохладное лето, плоский рельеф, наличие вечномерзлых грунтов и высокая влажность воздуха обуславливают прогрессирующее заболачивание территории и обилие застойных озер.

Территория относится к восточной части Ямальской геокриологической области в районе развития многолетней мерзлоты переменной мощности. Глубина кровли ММП изменяется от 0,5 до 1,5 м, а в долинах рек погружается до 5 м и ниже. Подошва залегает на глубине порядка 250–300 м. Верхняя часть наиболее льдистая, с глубиной этот показатель убывает.

Толща мерзлоты по строению неоднородна и включает различного размера линзы и пласты льда толщиной от 0,5 до 30,0 м, линзы криопэгов, газовые и газогидратные скопления, талики преимущественно гидрогенного типа. Под озерами встречаются сквозные талики. Толща ММП рыхлых осадочных пород кайнозойских отложений Ямальской геокриологической области, сцементированных при промерзании льдом или охлажденных, засоленна на всю глубину и содержит гравийные, песчаные, пылеватые, глинистые и коллоидно-дисперсные частицы.

По данным предшествующих исследований (1970–1980 гг.), подошва ММП залегает на глубине от 250 до 300 м. Известно, что подошва многолетнемерзлых толщ фиксиру-



ется по наиболее глубокому залеганию эвидентных (видимых) или латентных (скрытых) ледяных включений. В пределах Ямальской геокриологической области ММП достаточно заметно засолены, поэтому при температуре выше $-1,8...-2,0$ °C они не замерзают, то есть не происходит льдовыделения. Ниже подошвы ММП фиксируется толща пород с отрицательной температурой без включений льда. В целом глубина криолитозоны по нулевой изотерме на востоке Ямальской геокриологической области находится на глубине около 500 м.

Газопроявления из многолетнемерзлых толщ являются важной спецификой Ямальской геокриологической области. Большинство наиболее известных из них приурочено к морским суглинистым отложениям салехардской свиты, другие связаны с супесчано-суглинистыми морскими отложениями казанцевской свиты.

Большинство выбросов газа приурочено к участкам пониженного засоления. Однако ниже данных проявлений отмечается увеличение общей засоленности.

На востоке Ямальской геокриологической области зафиксирован пока единичный случай слабого газопроявления из толщи салехардских суглинков с прослоями песков и включениями слаборазложившейся органики в интервале глубин от 70 до 95 м. Газопроявление сопровождалось барботацией глинистого раствора при бурении параметрической мерзлотной скважины.

В геологическом строении до глубины 500 м принимают участие четвертичные, палеогеновые и верхнемеловые отложения. Отложения верхнего мела представлены ганькинской свитой (маастрихт), которая сложена морскими серыми и зеленовато-серыми глинами со слабым зеленоватым оттенком, слабоалевритистыми, известковистыми, слюдистыми, в нижней части опоковидными. Встречаются пиритизированные водоросли и остатки гастропод. Мощность свиты составляет более 200 м.

Отложения палеоценового и эоценового отделов палеогеновой системы представлены тибейсалинской, серовской, ирбитской и тавдинской свитами.

1. Тибейсалинская свита (мощностью около 100 м) в нижней части сложена глинами, в том числе опоковидными, в верхней – песками, каолинизированными слоями.

2. Серовская свита (мощностью около 20 м) представлена опоковидными глинами с прослоями опок и диатомитовых глин.

3. Ирбитская свита сложена диатомитами и глинами с фауной радиолярий и диатомей. В верхней части – слоями монтмориллонитовых глин. Мощность свиты на Малыгинской площади составляет около 100 м.

4. Тавдинская свита (мощностью около 80 м) в нижней части представлена алевритистыми глинами с прослоями глауконитового песка, в верхней – преимущественно серыми песками.

Четвертичные отложения с разрывом залегают на палеогеновых отложениях и представлены песками, глинами, торфом суммарной мощностью до 140 м. По генезису это преимущественно отложения пойм, надпойменных террас и болот.

В соответствии с тектонической картой мезозойско-кайнозойского ортоплатформенного чехла Западно-Сибирской геосинеклизы участок расположен в пределах Ямало-Гыданской синеклизы и приурочен к Северо-Ямальскому мегавалу.

Месторождение является многопластовым. Здесь открыты промышленные залежи газа и газоконденсата в 30 пластах в диапазоне от сеномана до средней юры включительно. Непосредственно на территории месторождения пробурено более 50 скважин глубокого бурения, из них только в 8 имеется каротаж сопротивления на верхнюю часть разреза, в редком случае описана стратиграфия до глубины 500 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Электроразведочные исследования мЗСБ для изучения вечной мерзлоты ведутся на территории Ямало-Ненецкого автономного округа уже более шести лет. На сегодняшний день установлено, что мерзлота характеризуется высокой степенью неоднородности за счет наличия в ней таликов, криопэгов, газовых гидратов и других особенностей, влияющих на ее строение и геоэлектрические характеристики [14, 15]. Проведенные работы позволили изучить строение криолитозоны округа до глубины 500 м, что дало возможность использовать полученные результаты для составления карт регионального распространения вечной мерзлоты и мониторинга опасных геологических процессов.



В последние годы остро стоит вопрос изучения газовых гидратов в вечной мерзлоте. В данном контексте геофизические исследования являются важным инструментом для изучения, оценки возникновения и распределения указанных ресурсов. На сегодняшний день проведены многочисленные исследования газовых гидратов в районах вечной мерзлоты, особое внимание уделено их геологическому происхождению, ресурсному потенциалу, влиянию на климат и окружающую среду, а также методам эксплуатации.

Развитие геофизических исследований газовых гидратов, в том числе электроразведочных и связанных с ними по данной тематике, является важной задачей, которой следует уделять первостепенное внимание. Рассмотрев последние исследования, можно уверенно заявить о том, что газовые гидраты выделяются по электрическим методам повышенными УЭС.

На основе анализа электроразведочных материалов, полученных авторами в северной части полуострова Ямал, было выявлено, что толща ММП на геоэлектрических разрезах картируется по высоким значениям сопротивления до 500–600 Ом·м. Высокие значения сопротивления свидетельствуют о включениях льда в отложениях четвертичной и палеогеновой систем.

Мощность льдонасыщенной мерзлой толщи, неоднородной по геоэлектрическому строению (что также характеризует ее неоднородное геологическое и криогидрологическое строение), составляет в среднем 250 м. Трансформации внутри толщи ММП могут быть связаны с изменением градиента температуры, льдистости, развитием таликов и криопэгов, газовых гидратов, характерных для северной части Ямала, а также другими криогенными литологическими факторами.

На фоне общего относительно высокого сопротивления (500–600 Ом·м) в толще ММП отмечаются локальные аномалии как пониженного, так и повышенного сопротивления.

Низкоомные аномалии (5–20 Ом·м) связаны с развитием таликов различного типа, а зоны с аномально высоким сопротивлением (200–800 Ом·м) – с участками повышенной льдистости. С глубины 250 м сопротивление вниз по разрезу понижается до 3 Ом·м. Здесь залегают преимущественно морозные породы без включений льда, которые, однако, также имеют низкую температуру.

Таким образом, по контрастной смене значений сопротивления с глубиной от 500–600 до 5–20 Ом·м картируется контакт между льдонасыщенными и нельдистыми породами в толще засоленных грунтов, то есть определена глубина положения подошвы яруса мерзлых пород криогенной толщи.

Благодаря проведенному анализу каротажа сопротивления в скважинах глубокого бурения на участке работ, можно отметить, что для интервала от 0 до 150–200 м характерно высокое сопротивление (100–250 Ом·м). В нем залегают четвертичные отложения (Q), представленные многолетнемерзлыми терригенными породами. Ствол одной из скважин в данном интервале разбит глубокими кавернами (>700 мм), которые формируются в зонах ММП за счет вытаивания льда (рис. 2).

Данные каротажа и литологии в скважинах подтверждают распространение в интервале до 250 м ММП. Ниже по разрезу сопротивление пород по данным каротажа понижается до 5–10 Ом·м. В скважине на данной глубине залегают палеогеновые отложения тибейсалинской свиты (Pgtbs), литологически выраженные чередованием глин и алевролитов, которые подстилаются терригенными отложениями ганькинской свиты (K₂gn), представленными чередованием глин, песчаников и алевролитов.

В Западной Сибири предположительные залежи газовых гидратов в интервале тибейсалинской свиты обнаружены на Бованенковском, Ямбургском, Заполярном и Мессояхском месторождениях. Причем возможно наличие как стабильных газовых гидратов, так и свободного газа. На территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения газопроявления из зоны стабильности газовых гидратов сосредоточены в интервале глубин 400–550 м и приурочены к континентальной подсвите тибейсалинской свиты [16].

Что характерно, по данным как мЗСБ, так и каротажа, в интервале залегания тибейсалинской свиты отмечаются локальные участки повышения сопротивления. Авторы полагают, что подобные аномалии могут быть связаны с газовыми гидратами. Повышенные УЭС – один из основных петрофизических признаков коллекторов, содержащих природные скопления газовых гидратов⁴.

⁴ Ильин А.В. Газогидраты севера Тюменской области как новый объект изучения геофизическими методами: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Екатеринбург, 2012. 107 с.

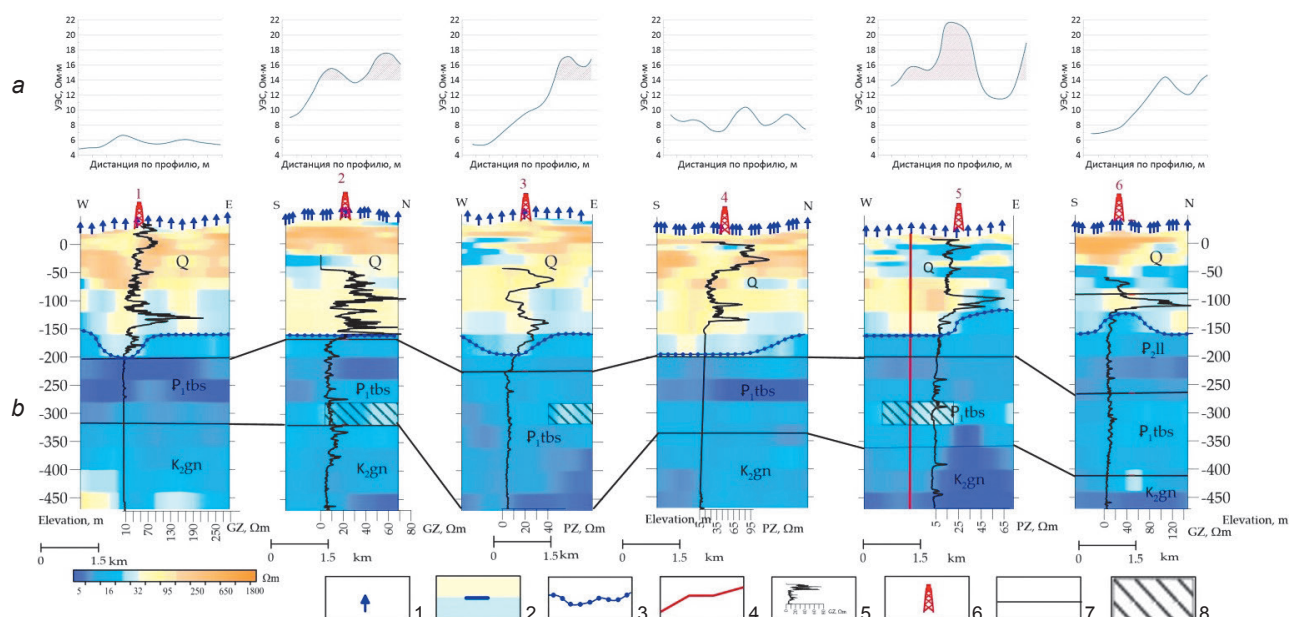


Рис. 2. Корреляционный геоэлектрический профиль через скважины:

a – графики удельного электрического сопротивления в интервале предполагаемого залегания

газовых гидратов в тибейсалинской свите; *b* – геоэлектрические разрезы через скважины

1 – пункты малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне;

2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивление, Ом·м; 3 – предполагаемая граница льдистой многолетнемерзлой породы; 4 – тектонические нарушения; 5 – каротаж сопротивления, Ом·м;

6 – скважины глубокого бурения; 7 – стратиграфические границы;

8 – зоны предполагаемого залегания газовых гидратов в тибейсалинской свите

Fig. 2. Correlation geoelectric profile through wells:

a – resistivity graphs in the interval of supposed gas hydrate occurrence

in the Tibetsalinskaya formation; *b* – geoelectric sections through wells

1 – points of shallow near-field transient electromagnetic sounding;

2 – geoelectric horizons and their resistivity, Ohm·m; 3 – supposed boundary of icy permafrost;

4 – tectonic faults; 5 – resistivity logging, Ohm·m; 6 – deep drilling wells; 7 – stratigraphic boundaries;

8 – zones of supposed gas hydrate occurrence in the Tibetsalinskaya Formation

По данным, представленным И.Г. Низаевой с соавторами [17], методы определения УЭС также являются одними из наиболее информативных для выделения скоплений газовых гидратов. Помимо этого, в стандартный комплекс геофизических исследований скважин для их картирования входят термометрия, кавернометрия, метод самопроизвольной поляризации, гамма-каротаж и газовый каротаж. Отрицательная аномалия потенциала собственной поляризации, низкие показания гамма-каротажа, отрицательная температура по термограмме, средние газовые показания, а также повышенные показания УЭС по каротажу сопротивления могут указывать на наличие газовых гидратов [17].

По данным других исследований, особое внимание в выделении газовых гидратов отводится анализу УЭС, а именно его повышенным показаниям в интервале залегания газовых гидратов [18].

Таким образом, повышенные УЭС (по данным мЗСБ и каротажа) в интервале тибейсалинской свиты на качественном уровне могут

говорить о наличии залежи газовых гидратов. Состав свиты указывает на возможность формирования в ее пределах хороших коллекторов. Перекрывающая (преимущественно глинистая) ирбитская свита может являться крышкой, а большая часть тибейсалинской свиты, по мнению В.С. Якушева, находится в зоне стабильности газовых гидратов [16].

Необходимо понимать, что на фактические значения удельного сопротивления могут влиять многие факторы, поэтому необходимо оценивать характеристики распределения гидрата не только по удельному сопротивлению, но и с привлечением других методов каротажа, а также при возможности сейсморазведки. Кроме того, при интерпретации геофизических данных необходимо учитывать многочисленные факторы: литологические особенности, геокриологические условия разреза, положение зон метастабильности и стабильности газовых гидратов, наличие залежей свободного



газа в более глубоких горизонтах и тектонических нарушениях, наличие путей миграции газа из нижележащих горизонтов. Полученные в ходе исследования наблюдения позволяют наметить дальнейшие пути для геофизических исследований с целью картирования газовых гидратов.

Заключение

Геофизические исследования методом мЗСБ при совместном анализе с особенностями гидрогеологического и криогенного строения, результатами бурения и лабораторных экспериментов помогут внести значительный вклад в изучение мерзлоты и газогидратообразования. При поисках и разведке месторождений газовых гидратов важным представляется применение комплекса геофизических методов сейсморазведки, георадара, электро-томографии и ЗСБ.

Подобная методика показала высокую эффективность на полигоне вблизи Салехарда (полуостров Ямал), где в ходе комплексных полевых исследований были получены геолого-геофизические модели разреза для раз-

личных глубин – от самых верхних горизонтов (первые метры) до более 500–700 м, изучено внутреннее строение ММП, выявлены ослабленные зоны (разломы) [19, 20].

Комплексирование геофизических методов сейсмо- и электроразведки позволяет сформировать физико-геологическую модель интервала криолитозоны, освещающую как упругие свойства среды (продольные и поперечные скорости), так и УЭС, характеризующие и возможное наличие залежей газовых гидратов, и структурно-тектоническое строение территории исследования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение комплекса методов полевой геофизики (сейсморазведки, георадара, электротомографии и ЗСБ), бурение скважин с отбором керна, обязательным комплексом геофизических, гидродинамических, лабораторных исследований, а также комплексной геолого-геофизической интерпретацией полученных данных имеют большое значение для изучения и понимания физико-геологической модели строения газовых гидратов в арктических регионах России.

Список источников

1. Щёлокова Д.В. Нетрадиционные углеводороды как источник неисчерпаемости топливно-энергетических ресурсов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 1. С. 120–126. EDN: VZYTJVJ.
2. Дмитриевский А.Н. Нетрадиционные ресурсы нефти и газа России: проблемы и перспективы освоения // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2014. № 2. С. 1. EDN: THNLIB.
3. Бессель В.В. Нетрадиционные углеводородные ресурсы – альтернатива или миф? // Neftegaz.RU. 2013. № 9. Режим доступа: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/aktualno/620919-netraditsionnye-uglevodorodnye-resursy-alternativa-ili-mif/> (дата обращения: 15.05.2024).
4. Воробьев К.А., Пяткова М.Е., Щерба В.А. Перспективы освоения месторождений газовых гидратов на территории Российской Федерации // География: развитие науки и образования: сб. статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2022. С. 174–180. EDN: SVIZRG.
5. Друщиц В.А., Садчикова Т.А., Сколотнева Т.С. Гидраты газа на суше и шельфе Арктики и изменение природной среды в квартере // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2011. № 71. С. 124–134.
6. Чувилин Е.М., Давлетшина Д.А., Лупачик М.В. Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 2. С. 50–61. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2\(50-61\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2(50-61)). EDN: YUWSSY.
7. Buddo I., Misyrkeeva N., Shelokhov I., Chuvilin E., Chernikh A., Smirnov A. Imaging Arctic permafrost: modeling for choice of geophysical methods // Geosciences. 2022. Vol. 12. Iss. 10. P. 389. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100389>.
8. Матвеева Т.В. Методика и этапность изучения потенциально гидратоносных акваторий и залежей газовых гидратов // Недропользование XXI век. 2014. № 3. С. 74–79. EDN: SXVEML.
9. Schwalenberg K., Rippe D., Koch S., Scholl C. Marine-controlled source electromagnetic study of methane seeps and gas hydrates at Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. Vol. 122. Iss. 5. P. 3334–3350. <https://doi.org/10.1002/2016JB013702>.
10. Gabitto J. F., Tsouri C. Physical properties of gas hydrates: a review // Journal of Thermodynamics. 2010. P. 271291. <https://doi.org/10.1155/2010/271291>.
11. Dvorkin J., Nur A. Seismic amplitudes from gas hydrates // E&P. 2007. P. 1–2. Режим доступа: https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/NT42663_EPPaper_2007.pdf (дата обращения: 15.05.2024).
12. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: монография. Новосибирск: Наука, 1970. 124 с.
13. Поспеев 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. <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>. EDN: VTWOGC.



14. Misurkeeva N.V., Buddo I.V., Kraev G.N., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A., Shelokhov I.A., et al. Periglacial landforms and fluid dynamics in the permafrost domain: a case from the Taz Peninsula, West Siberia // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 8. P. 2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.
15. Misurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Yu. Thickness and structure of permafrost oil and gas fields of the Yamal Peninsula: Evidence from Shallow Transient Electromagnetic (sTEM) Survey // *Water*. 2024. Vol. 16. Iss. 18. P. 2633. <https://doi.org/10.3390/w16182633>.
16. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувиллин Е.М., Козлова Е.В. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // *Российский химический журнал*. 2003. Т. 47. № 3. С. 80–90. EDN: WBFUVB.
17. Низаева И.Г., Давлетова А.А., Валиуллин Р.А. Выделение гидратонасыщенных пластов методами ГИС в зонах многолетнемерзлых пород // *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2023. Т. 47. № 2. С. 43–51. https://doi.org/10.24412/1728-5283_2023_2_43_51. EDN: JZGVGD.
18. Chen Y., Li D., Liang D., Zhou X., Wu N. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea // *Acta Petrolei Sinica*. 2013. Vol. 34. Iss. 3. P. 507–512. <https://doi.org/10.7623/syxb201303012>.
19. Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Шеин А.Н., Добрынина А.А., Смирнов А.С. [и др.]. Опыт комплексирования геофизических методов при изучении возможных проявлений флюидодинамических процессов в Арктике // *Газовые гидраты – энергия будущего (РГК I): материалы первой Российской газогидратной конференции (п. Листвянка, 26–31 августа 2024 г.)*. Санкт-Петербург: Изд-во ВНИИОкеангеологии, 2024. С. 57–61. <https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-57-61>. EDN: MLGKIN.
20. Buddo I., Misurkeeva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., et al. Modeling of explosive pingo-like structures and fluid-dynamic processes in the Arctic permafrost: workflow based on integrated geophysical, geocryological, and analytical data // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 16. P. 2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.

References

1. Shchelokova D.V. Non-conventional hydrocarbons as a source of inexhaustible energy resources. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2016;1:120-126. (In Russ.). EDN: VZYTJVJ.
2. Dmitrievsky A.N. Mastering of the unconventional hydrocarbon resources of Russia. *Georesources, Geoenergy and Geopolitics*. 2014;2:1. (In Russ.). EDN: THNLIB.
3. Bessel' V.V. Unconventional hydrocarbon resources – an alternative or a myth? *Neftegaz.RU*. 2013;9. Available from: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/aktualno/620919-netraditsionnye-uglevodorodnye-resursy-alternativa-ili-mif/> [Accessed 15th May 2024]. (In Russ.).
4. Vorobiev K.A., Pyatkova M.E., Shcherba V.A. Development prospects of gas hydrate deposits on the territory of the Russian Federation. *Geography: development of science and education: collected articles on the materials of the International scientific and practical conference*. St. Petersburg: Herzen University; 2022, p. 174-180. (In Russ.). EDN: SVIZRG.
5. Droushchits V.A., Sadchikova T.A., Skolotneva T.S. Gas hydrates on the Arctic land and offshore and natural environment changes in the Quaternary. *Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary*. 2011;71:124-134. (In Russ.).
6. Chuvilin E.M., Davletshina D.A., Lupachik M.V. Hydrate formation in frozen and thawing methane-saturated sediments. *Kriosfera Zemli*. 2019;23(2):50-61. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2\(50-61\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2(50-61)). EDN: YUWSSY.
7. Buddo I., Misurkeeva N., Shelokhov I., Chuvilin E., Chernikh A., Smirnov A. Imaging Arctic permafrost: modeling for choice of geophysical methods. *Geosciences*. 2022;12(10):389. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100389>.
8. Matveeva M.T. Methodology and stage-by-stage approach for the exploration of potentially gas hydrate-bearing water areas and hydrate accumulations. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2014;3:74-79. (In Russ.). EDN: SXVEML.
9. Schwalenberg K., Rippe D., Koch S., Scholl C. Marine-controlled source electromagnetic study of methane seeps and gas hydrates at Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017;122(5):3334-3350. <https://doi.org/10.1002/2016JB013702>.
10. Gabitto J. F., Tsouri C. Physical properties of gas hydrates: a review. *Journal of Thermodynamics*. 2010:271291. <https://doi.org/10.1155/2010/271291>.
11. Dvorkin J., Nur A. Seismic amplitudes from gas hydrates. *E&P*. 2007;1-2. Available from: https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/NT42663_EPPaper_2007.pdf [Accessed 15th May 2024].
12. Kaufman A.A., Morozova G.M. *Theoretical foundations of the method of transient electromagnetic sounding in the near zone*. Novosibirsk: Nauka; 1970, 124 p. (In Russ.).
13. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Y.A., Sharlov M.V., Kompaniec S.V., Tokareva O.V., et al. *Modern applied electroprospecting*. Novosibirsk: Geo; 2018, 231 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>. EDN: VTWOGC.
14. Misurkeeva N.V., Buddo I.V., Kraev G.N., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A., Shelokhov I.A., et al. Periglacial landforms and fluid dynamics in the permafrost domain: a case from the Taz Peninsula, West Siberia. *Energies*. 2022;15(8):2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.
15. Misurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Yu. Thickness and structure of permafrost oil and gas fields of the Yamal Peninsula: evidence from shallow transient electromagnetic (sTEM) survey. *Water*. 2024;16(18):2633. <https://doi.org/10.3390/w16182633>.



16. Jakushev V.S., Perlova E.V., Mahonina N.A., Chuvilin E.M., Kozlova E.V. Gas hydrates in sediments of continents and islands. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2003;47(3):80-90. (In Russ.). EDN: WBFUVB.
17. Nizaeva I.G., Davletova A.A., Valiullin R.A. Isolation of hydrate-saturated reservoirs by well logging methods in permafrost zones. *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2023;47(2):43-51. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/1728-5283_2023_2_43_51. EDN: JZGVGD.
18. Chen Y., Li D., Liang D., Zhou X., Wu N. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*. 2013;34(3):507-512. (In Chinese). <https://doi.org/10.7623/syxb201303012>.
19. Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Shein A.N., Dobrynina A.A., Smirnov A.S., et al. Geophysical methods integration for studying possible shows of fluidodynamic processes in the Arctic. In: *Gazovye gidraty – energija budushhego (RGK I): materialy pervoj Rossijskoj gazogidratnoj konferencii = Gas hydrates – the energy of the future (RGK I): Proceedings of the First Russian Gas Hydrate Conference*. 26–31 August 2024, Listvyanka. Saint-Petersburg: VNIIOkeangeologia; 2024, p. 57-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-57-61>. EDN: MLGKIN.
20. Buddo I., Misyurkeeva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., et al. Modeling of explosive pingo-like structures and fluid-dynamic processes in the Arctic permafrost: workflow based on integrated geophysical, geocryological, and analytical data. *Remote Sensing*. 2024;16(16):2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.

Информация об авторах / Information about the authors



Мисюркеева Наталья Викторовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

✉ mnv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>

Natalya V. Misyurkeeva,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,

✉ mnv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией комплексной геофизики,
лабораторией комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

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

г. Иркутск, Россия,

biv@crust.irk.ru

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

Igor V. Buddo,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,

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

biv@crust.irk.ru

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



Шелохов Иван Антонович,

кандидат геолого-минералогических наук,
 младший научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики,
 лаборатории комплексных исследований Арктики,
 Институт земной коры СО РАН,
 г. Иркутск, Россия,
 sia@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>

Ivan A. Shelokhov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
 Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Geophysics,
 Laboratory of Integrated Arctic Research,
 Institute of the Earth's Crust SB RAS,
 Irkutsk, Russia,
 sia@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>



Смирнов Александр Сергеевич,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
 ведущий научный сотрудник,
 Научный центр изучения Арктики,
 г. Салехард, Россия,
 dasertx@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6837-199X>

Alexander S. Smirnov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
 Leading Researcher,
 Arctic Research Center,
 Salekhard, Russia,
 dasertx@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6837-199X>



Нежданов Алексей Алексеевич,

доктор геолого-минералогических наук,
 советник по геологии,
 Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики,
 г. Тюмень, Россия,
 nezhdanovaa@zsnigg.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9453-7962>

Alexey A. Nezhdanov,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
 Advisor on Geology,
 West Siberian Research Institute of Geology and Geophysics,
 Tyumen, Russia,
 nezhdanovaa@zsnigg.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9453-7962>

Вклад авторов / Contribution of the author

Н.В. Мисюркеева – разработка концепции, визуализация, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

И.В. Буддо – административное руководство исследовательским проектом, разработка концепции.

И.А. Шелохов – валидация результатов, визуализация.

А.С. Смирнов – предоставление ресурсов, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А.А. Нежданов – научное руководство, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Natalya V. Misurkeeva – conceptualization, visualization, writing – original draft, writing – review & editing.

Igor V. Buddo – project administration, conceptualization.

Ivan A. Shelokhov – validation, visualization.

Alexander S. Smirnov – resources, data curation, writing – review & editing.

Alexey A. Nezhdanov – supervision, data curation, writing – review & editing.

**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 13.11.2024; одобрена после рецензирования 09.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 09.12.2024; accepted for publication 16.12.2024.



ГЕОФИЗИКА

Краткое сообщение

УДК 550.03

EDN: RSPKFO

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-381-388



Возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе становления электромагнитного поля

© А.В. Поспеев^a, И.В. Буддо^b, Д.Ф. Абсальямова^{c✉}

^{a,b}Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^{a,c}АО «Иркутское электроразведочное предприятие», Иркутск, Россия

Резюме. В ходе проведенной работы рассматривались возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе зондирования становлением электромагнитного поля за счет определения величины эффективного разноса. Актуальность решения данной задачи заключалась в необходимости применения индуктивной электроразведки с использованием незаземленных соосно-разнесенных установок в природно-климатических условиях Арктики. Оптимизация технологии проведения исследований методом зондирования становлением электромагнитного поля в дальней и ближней зонах позволит расширить диапазон изучаемых глубин, что крайне важно для исследований скоплений трудноизвлекаемых углеводородов, залегающих на глубинах от первых десятков метров до 3–4 км. При решении данной задачи для модели полупространства было произведено математическое моделирование сигналов зондирования становлением электромагнитного поля с учетом геометрического разноса, что позволило за счет решения обратной задачи определить эффективный разнос. На основе полученных данных была построена номограмма зависимости эффективного разноса от размера генераторной петли и геометрического разноса установки. Использование полученных в ходе исследования результатов позволяет обеспечивать фактическую стартовую глубинность электромагнитных зондирований от 7–10 м, что существенно повышает диапазон изучаемых глубин за счет интерпретации дальней зоны зондирования.

Ключевые слова: электромагнитные зондирования, зондирования становлением поля, ближняя и дальняя зоны зондирования, многоразносные установки, математическое моделирование, Арктика

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Для цитирования: Поспеев А.В., Буддо И.В., Абсальямова Д.Ф. Возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе становления электромагнитного поля // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 381–388. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-381-388>. EDN: RSPKFO.

GEOPHYSICS

Brief report

Reducing starting depth in the transient electromagnetic method

© Alexander V. Pospeev^a, Igor V. Buddo^b, Daria F. Absalyamova^{c✉}

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

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{a,c}JSC Irkutsk Electroprospecting Company, Irkutsk, Russia

Abstract. The article considers the possibilities of reducing the starting depth of studies using the near-field transient electromagnetic method by determining the effective transmitter-receiver offset. The solution of this problem is relevant due to the need to apply inductive electromagnetic exploration using ungrounded multi-offset templates in the climatic conditions of the Arctic. Optimization of the transient electromagnetic method technology in the far- and near-field zones will expand the range of explored depths, which is extremely important for studying the accumulations of difficult to recover hydrocarbons located at depths from the first tens of meters to 3–4 km. To solve this problem for a half-space model, mathematical



modeling of the transient electromagnetic signals was carried out taking into account the geometric spacing of soundings, which allowed to determine the effective signal offset by solving the inverse problem. On the basis of the mathematical modeling performed, a nomogram of the effective offset dependence on the transmitter loop size and template geometric spacing has been built. The use of the results obtained makes it possible to provide the actual starting depth of electromagnetic soundings from 7–10 m, which significantly increases the range of the studied depths due to the interpretation of the far-field sounding zone.

Keywords: electromagnetic soundings, transient electromagnetic sounding (TEM sounding), near- and far-field zones, multi-spacing sounding installations, mathematical modeling, Arctic

Funding: The research was carried out under the topic no. 1023110300018-4-1.5.4 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Youth Laboratory of Integrated Arctic Research of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk).

For citation: Pospeev A.V., Buddo I.V., Absalyamova D.F. Reducing starting depth in the transient electromagnetic method. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):381-388. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-381-388>. EDN: RSPKFO.

Введение

Уменьшение стартовой глубины исследований в методе зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС) за счет определения величины эффективного разноса актуально ввиду необходимости применения индуктивной электроразведки с использованием незаземленных соосно-разнесенных установок в природно-климатических условиях Арктики [1, 2]. Оптимизация технологии проведения работ методом зондирования становлением электромагнитного поля в дальней (ЗСД) и ближней (ЗСБ) зонах позволит расширить диапазон изучаемых глубин [3], что крайне важно для исследований скоплений трудноизвлекаемых углеводородов, залегающих на глубинах от первых десятков метров до 3–4 км. Последние десятилетия электромагнитные методы широко применяются для решения геологических задач (как для верхней части разреза, так и для глубоких интервалов) [4, 5].

Метод ЗС с импульсным контролируемым источником основан на изучении поля переходных процессов, которое при изменении тока в источнике возбуждается в земле [6, 7]. В зависимости от времени зондирования, разноса между источником и приемником, а также геоэлектрической модели среды существуют две основные зоны зондирования: волновая, когда электромагнитное поле распространяется по воздуху подобно волне, и ближняя, когда оно проникает в землю диффузионным способом [8, 6]. Технологии современных нестационарных электромагнитных зондирований предусматривают использование многоразносных установок, существенно повышающих детальность исследований и позволяющих обеспечи-

вать устойчивую оценку геоэлектрических параметров разреза в условиях наличия частотной дисперсии электрических свойств пород [9, 10]. Тем не менее в процессе инверсии, как правило, используется диапазон времен, преимущественно относящийся к ближней зоне зондирования, что существенно увеличивает стартовую глубинность исследований при использовании больших разносов [11, 12].

Следующей проблемой является то, что использование формулы кажущегося сопротивления для ближней зоны на ранних временах становления приводит к формированию левых ветвей кривых ρ_k , не отражающих истинное удельное сопротивление среды [13]. Прямой расчет по формуле волновой зоны зондирования с использованием реального разноса между источником и приемником дает искаженный уровень кривых, не отвечающий реальной геоэлектрической модели.

Рассмотрение практических кривых волновой зоны зондирования показывает, что ранее некоторых времен, пропорциональных размеру генераторной петли (магнитного диполя), кривая ЗСБ не реагирует на изменение электропроводности среды. Таким образом, повышение стартовой глубинности ЗС за счет определения эффективного разноса установки является важной задачей, требующей решения.

Материалы и методы исследования

Генераторная петля индуцирует магнитное поле, которое внутри контура источника имеет положительное, а за пределами – отрицательное направление¹. После переключения тока в источнике формируется электромагнит-

¹ Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл». Новосибирск: Изд-во СНИИГиМС, 1981. 98 с.



ная волна, имеющая два пути распространения: волновой (по воздуху) и диффузионный (в среде) [14]. Во втором случае поле вертикального магнитного диполя не зависит от разноса, поэтому в формуле расчета кажущегося сопротивления ρ_τ разнос между приемником и источником не вводится (1):

$$\rho_\tau(ЗСБ) = \frac{K}{\left(\frac{\Delta V}{I}\right)^{2/3} \cdot t^{5/3}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент установки, м; $\frac{\Delta V}{I}$ – сигнал электромагнитного поля, В/А; t – время становления, с.

В отличие от этого, электродвижущая сила в волновой зоне для вертикальной магнитной компоненты (установки $Q-q$ (петля – петля)) убывает обратно пропорционально пятой степени разноса (2):

$$\rho_\tau(ЗСД) = K \cdot \frac{\Delta V}{I}. \quad (2)$$

После выключения тока волна не может мгновенно достичь приемника, поскольку ей необходимо преодолеть расстояние между ним и генераторным контуром² [15]. Если приемник расположен внутри источника, то эффективный разнос больше геометрического (равен нулю для соосной установки). При расположении приемника за пределами источника он, наоборот, меньше геометрического [16] (рис. 1).

Моделирование сигналов становления для однородного полупространства с использованием прямой задачи А.М. Каминского³ показывает, что амплитуда поля на ранних временах становления соответствует не расстоянию между центрами генераторного и приемного диполей, а некоторому отличающемуся от него эффективному разносу. Расчет кривых ЗСБ выполнялся для источника размером 500×500 м, приемника – 18×18 м, для полупространства с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м.

Результаты исследования и их обсуждение

Кривые ЗСД и ЗСБ в приведенной системе координат рассчитаны с использованием ис-

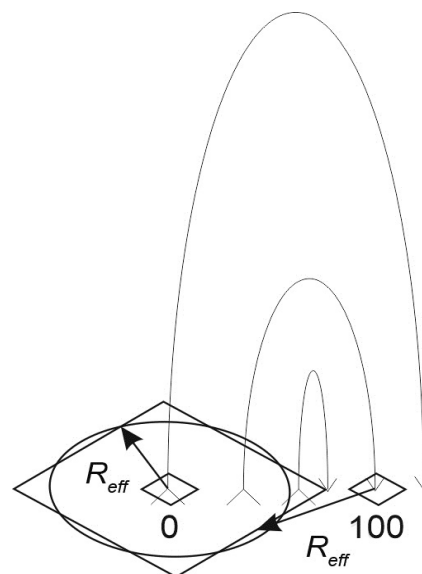


Рис. 1. Схема формирования эффективного разноса методом зондирования становлением электромагнитного поля (индексами указан размер геометрического разноса (0 и 100 м))
Fig. 1. Diagram of effective offset formation by the method of near-field transient electromagnetic sounding (indices show the size of geometric spacing (0 and 100 m))

тинного разноса зондирования [17]. Отличие положения левых ветвей кривых зондирования от удельного электрического сопротивления однородного полупространства $\rho_{пп}$, для которого проведены расчеты (в данном случае – 10 Ом·м) [18], уменьшается с ростом геометрического разноса. Анализ полученных данных позволил реализовать решение обратной задачи, то есть по амплитуде сигналов на ранних временах определить эффективный разнос зондирования. Поскольку

$$\rho_\tau(ЗСД) = \frac{R^5}{M \cdot m} \cdot \frac{\Delta V}{I}, \quad (3)$$

где R – геометрический разнос установки, м; M – момент источника, м²; m – момент приемника, м², эффективный разнос R_{eff} составит

$$R_{eff} = \left[\rho_{пп} \cdot M \cdot m / \frac{\Delta V}{I} \right]^{1/5}, \quad (4)$$

где $\rho_{пп}$ – сопротивление однородного полупространства, Ом·м.

² McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN-7. Missasauga: Geonics Limited, 1980. 17 p. Режим доступа: <https://geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn7.pdf> (дата обращения: 17.09.2024).

³ Каминский А.М. Программа ZondTEM2d. Режим доступа: <http://zond-geo.com/software/electromagnetic-soundings/zondirovanie-stanovleniem-polya-zondtem2d/> (дата обращения: 06.11.2024).



Расчет кривых волновой зоны с использованием определенного таким образом эффективного разноса позволил привести кривые ЗСД к уровню удельного сопротивления однородного полупространства.

На следующем этапе было выполнено математическое моделирование сигналов ЗСБ для генераторных петель с длиной стороны, составляющей 100, 200, 400, 500 и 800 м, и разносами от 0 до 1000 м. По модельным сигналам в соответствии с формулой (4) рассчитаны эффективные разносы, на основании чего построена номограмма (рис. 2), которая позволяет рассчитать эффективный разнос как функцию длины стороны генераторной петли и расстояния между центрами источника и приемника. Рассмотрение практических (полученных в полевых условиях) кривых, зарегистрированных с использованием мало-глубинной установки ЗСБ с малыми стартовыми временами зондирования, показывает, что в достаточно большом диапазоне начальных времен $\rho_r(\text{ЗСД})$ практически не меняет уровень, то есть эффект зондирования среды отсутствует.

Для оценки стартовой глубины зондирования, в частности для установки 100×100 м

с разносом 100 м, была рассчитана серия кривых над модельным геоэлектрическим разрезом с высоким контрастом удельного электрического сопротивления слоев. Модель содержит стартовый слой толщиной 2 м, дальнейшие имеют толщину, увеличивающуюся в геометрической прогрессии. Удельное электрическое сопротивление нечетных слоев составляет 50 Ом·м, четных – 5000 Ом·м.

Исходная модель является стартовой (0, левая модель); затем удельное электрическое сопротивление первого четного слоя заменяется удельным сопротивлением, равным 50 Ом·м, так происходит и с последующими четными слоями до того, как кривая ЗСД не приобретет в диапазоне волновой зоны зондирования горизонтальную форму (рис. 3). Результаты расчетов для источника размером 100×100 м и разносом 100 м показаны на рис. 4.

Как мы видим, кривые, расположенные дальше третьей модели, не различаются. Мощность верхнего слоя во второй модели, которая демонстрирует изменения кривой зондирования, равна примерно 10 м. То есть фактическая стартовая глубинность составляет 7–10 м.

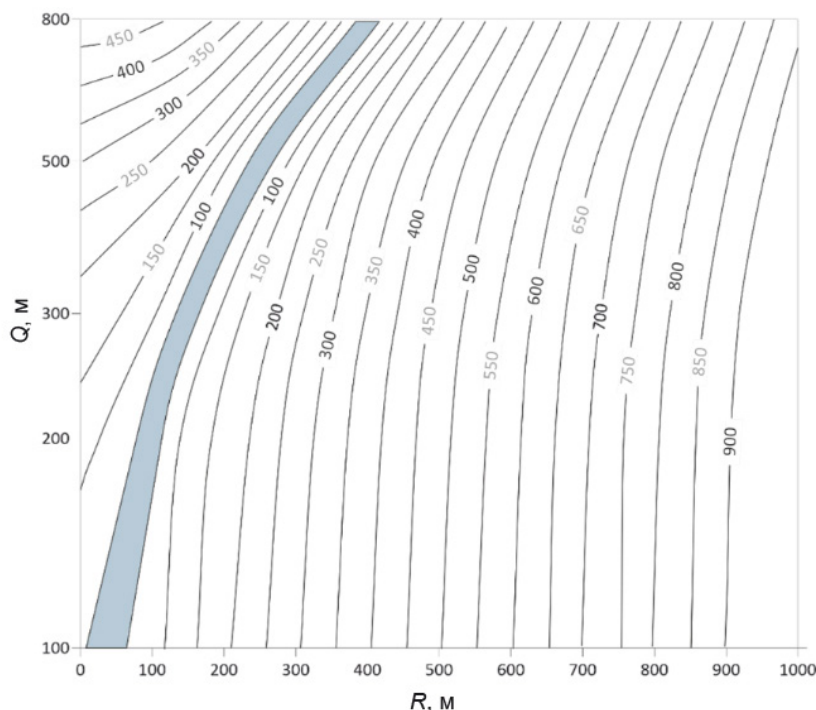


Рис. 2. Номограмма зависимости эффективного разноса R_{eff} от размера генераторной петли Q и геометрического разноса установки R (залитая область соответствует пространственному положению неустойчивого нестационарного поля источника)

Fig. 2. Nomogram of effective offset R_{eff} dependence on Q generator loop size and R installation geometric offset (the filled area corresponds to the spatial position of the unstable non-stationary field of the source)

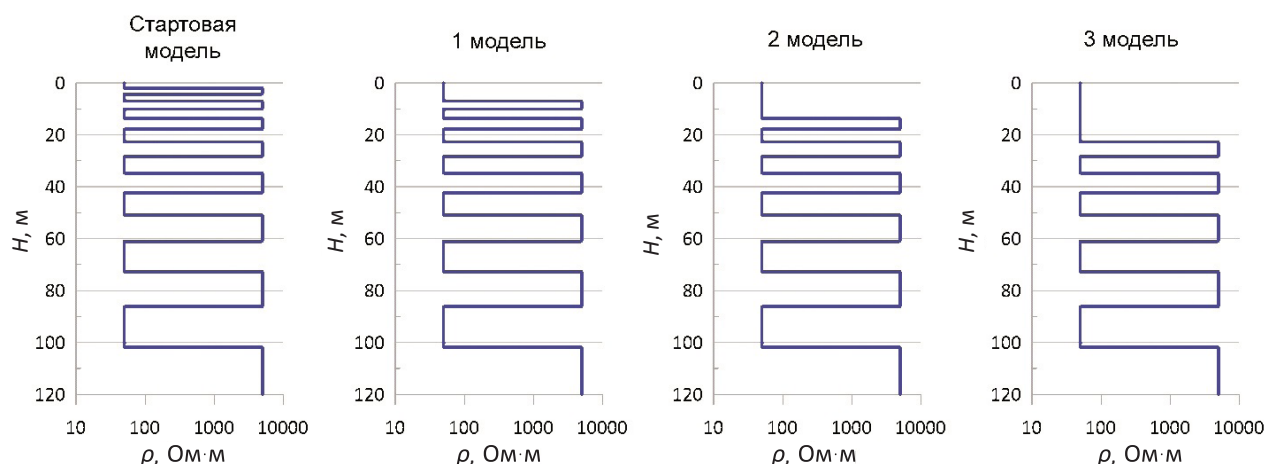


Рис. 3. Геоэлектрические модели для расчета стартовой глубины методом зондирования становлением электромагнитного поля
Fig. 3. Geoelectric models for starting depth calculation by the transient electromagnetic sounding

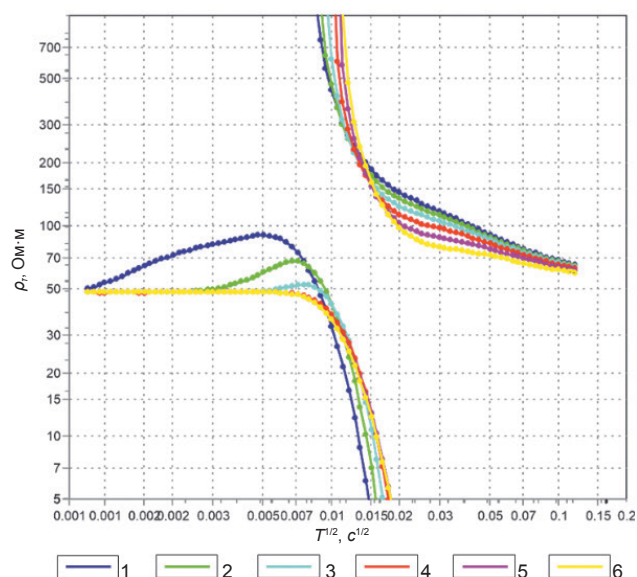


Рис. 4. Модельные кривые для установки 100×100 м с разномом 100 м:
1 – стартовая модель; 2 – первая модель; 3 – вторая модель; 4 – третья модель;
5 – четвертая модель; 6 – пятая модель

Fig. 4. Model curves for a 100×100 m transmitter loop with a 100 m space:
1 – starting model; 2 – 1st model; 3 – 2nd model; 4 – 3^d model;
5 – 4th model; 6 – 5th model

Закключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что использование сигналов становления поля на ранних временах позволяет уменьшить стартовую глубину зондирования без уменьшения размера генераторной петли. Расчет кривых волновой зоны зондирования с использованием эффективного разнота позволяет привести уровень кривых ЗСД к удельному электрическому сопротивлению слоя с эффективной глубиной исследования, зависящей от размера источника и параметров геоэлектрического разреза.

Полученные в ходе проведенной работы результаты повышают информативность электромагнитных зондирований путем вовлечения в интерпретацию ранних времен становления поля, относящихся к дальней зоне зондирования. Применение указанного способа открывает возможность детализации геоэлектрической модели среды, характеризующей верхнюю часть разреза, что существенно увеличивает достоверность решения геологических задач для рассмотренного интервала глубин [19, 20].



Список источников

1. Павленко В.И., Коротков Ю.В. Особенности и экономическая эффективность использования электроразведочного метода переходных процессов для инженерно-геологических изысканий в районах севера и Арктики России // Арктика: экология и экономика. 2012. № 4. С. 40–45. EDN: PXDAJJ.
2. Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А. Электроразведочные исследования ЗСБ для изучения криолитозоны арктической зоны Западной Сибири // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2023. Т. 8. № 3. С. 102–114. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-102-114>. EDN: EJKNST.
3. Ваньян Л.Л. Становление электромагнитного поля и его использование для решения задач структурной геологии. Новосибирск: Наука, 1966. 168 с.
4. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>. EDN: UVUNPA.
5. Баранов М. А., Компаниец С. В., Буддо И. В., Мисюркеева Н. В., Агафонов Ю. А. Возможности электромагнитных зондирований при картировании многолетнемерзлых пород // Вестник ИрГТУ. 2014. № 7. С. 25–31. EDN: SIJXIX.
6. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
7. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Новосибирск: Наука, 1970. 124 с.
8. Шейнман С.М. Современные физические основы теории электроразведки. Л.: Недра, 1969. 224 с.
9. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисловых исследованиях на юге Сибирской платформы // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 2. С. 151–164. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164>. EDN: WSDYQV.
10. Буддо И.В., Поспеев А.В. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 149 с.
11. Parasnis D.S. Principles of applied geophysics. London: Chapman & Hall, 1996. 456 p.
12. Компаниец С.В., Токарева О.В., Поспеев А.В., Семинский И.К. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрических моделей осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. 2014. № 5. С. 53–57. EDN: SGJFAB.
13. Li X., Xue G., Yin C. Migration Imaging of the transient electromagnetic method. Singapore: Springer, 2017. 148 p.
14. Попов С.Б. Исследование боковой воздушной электромагнитной волны в электроразведке // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 128. С. 1–36. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-128>. EDN: YKACDI.
15. Kearey P., Brooks M., Hill I. An introduction to geophysical exploration // Blackwell Science. 2002. Vol. 140. Iss. 3. P. 366–366. <https://doi.org/10.1017/S0016756803378021>.
16. Reynolds J.M. An Introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 796 p.
17. Поспеев 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. <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>. EDN: VTWOGC.
18. Ратушняк А.Н., Байдилов С.В. Импульсные индуктивные электромагнитные зондирования слоистых сред // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы Всероссий. конф. с междунар. участием (г. Екатеринбург, 20–24 сентября 2021 г.). Екатеринбург: Изд-во ИГФ УрО РАН, 2021. С. 200–204. EDN: CILVZA.
19. Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1974. 232 с.
20. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудиоманнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 9–19. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.9>. EDN: YGCWJV.

References

1. Pavlenko V.I., Korotkov Yu.V. Features and economic efficiency of using the electromagnetic sounding method of transient processes for engineering-geological surveys in the northern and Arctic regions of Russia. *Arctic: Ecology and Economy*. 2012;4:40-45. (In Russ.). EDN: PXDAJJ.
2. Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Agafonov Yu.A., Smirnov A.S., Nezdanov A.A. Transient electromagnetic surveys for the cryolithozone studies of the Western Siberia arctic zone. *PROneft. Professionals about Oil*. 2023;8(3):102-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-102-114>. EDN: EJKNST.
3. Van'jan L.L. Formation of electromagnetic field and its application for solving structural geology problems. Novosibirsk: Nauka, 1966. 168 p.
4. Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A. Complex electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic test area). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(2):461-487. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>. EDN: UVUNPA.
5. Baranov M., Kompaniets S., Buddo I., Misyurkeeva N., Agafonov Yu. Electromagnetic sounding potential for permafrost rocks mapping. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;7:25-31. (In Russ.). EDN: SIJXIX.



6. Van'jan L.L. *Fundamentals of electromagnetic sounding*. Moscow: Nedra; 1965, 109 p. (In Russ.).
7. Kaufman A.A., Morozova G.M. *Theoretical foundations of the near-field transient EM sounding method*. Novosibirsk: Nauka; 1970, 124 p. (In Russ.).
8. Sheinman S.M. *Modern physical foundations of the electrical prospecting theory*. Leningrad: Nedra; 1969, 224 p. (In Russ.).
9. Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Murzina E.V., Emelyanov V.S. Interpretation of near-field transient electromagnetic sounding data with the account of induction-induced polarization in areal exploration for oil and gas in the south of the Siberian craton. *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(2):151-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164>. EDN: WSDYQV.
10. Buddo I.V., Pospeev A.V. *Precision inversion of TEM in oil and gas exploration in the south of the Siberian platform*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2019, 149 p. (In Russ.).
11. Parasnis D.S. *Principles of applied geophysics*. London: Chapman & Hall; 1996, 456 p.
12. Kompaniets S., Tokareva O., Pospeev A., Seminsky I. To possibility of using lateral logging data when building geoelectric models of southern Siberian Platform sedimentary cover. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;5:53-57. (In Russ.). EDN: SGJFAB.
13. Li X., Xue G., Yin C. *Migration Imaging of the transient electromagnetic method*. Singapore: Springer; 2017, 148 p.
14. Popov S.B. Investigation of a lateral air electromagnetic wave in electrical prospecting. *Keldysh Institute Preprints*. 2020;128:1-36. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-128>. EDN: YKACDI.
15. Kearey P., Brooks M., Hill I. An Introduction to geophysical exploration. *Blackwell Science*. 2002;140(3):366-366. <https://doi.org/10.1017/S0016756803378021>.
16. Reynolds J.M. *An Introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: John Wiley & Sons; 1997, 796 p.
17. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Y.A., Sharlov M.V., Kompaniec S.V., Tokareva O.V., et al. *Modern applied electroprospecting*. Novosibirsk: Geo; 2018, 231 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>. EDN: VTWOGC.
18. Ratushnyak A., Baidikov S. Pulse inductive electromagnetic sensing of layered media. In: *Glubinnoe stroenie, geodinamika, teplovoe pole Zemli, interpretatsiya geofizicheskikh polei: materialy Vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem = Deep structure, geodynamics, thermal field of the Earth, interpretation of geophysical fields: materials of the All-Russian conference with International participation*. 20–24 September 2021, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Bulashevich Institute of Geophysics; 2021, p. 200-204. EDN: CILVZA.
19. Matveev B.K. *Interpretation of electromagnetic soundings*. Moscow: Nedra; 1974, 232 p.
20. Kulikov V.A., Kaminskij A.E., Yakovlev A.G. Joint two-dimensional inversion of electrotomography and audio magnetotelluric probing data in solving ore problems. *Journal of Mining Institute*. 2017;223:9-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.9>. EDN: YGCWJV.

Информация об авторах / Information about the authors



Поспеев Александр Валентинович,
 член-корреспондент РАН,
 доктор геолого-минералогических наук, профессор,
 ведущий научный сотрудник,
 Институт земной коры СО РАН,
 г. Иркутск, Россия,
 заместитель главного геофизика,
 АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,
 г. Иркутск, Россия,
avp@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5938-1942>
Alexander V. Pospeev,
 Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences,
 Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
 Leading Researcher,
 Institute of the Earth's Crust SB RAS,
 Irkutsk, Russia,
 Deputy Chief Geophysicist,
 JSC Irkutsk Electroprospecting Company,
 Irkutsk, Russia,
avp@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5938-1942>

**Буддо Игорь Владимирович,**

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией комплексной геофизики,
лабораторией комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
biv@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>

Igor V. Buddo,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
biv@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>

**Абсальямова Дарья Фахрулловна,**

геофизик,
АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,
г. Иркутск, Россия,
✉ absalyamovadf@rusgeology.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5602-5358>

Daria F. Absalyamova,

Geophysicist,
JSC Irkutsk Electroprospecting Company,
Irkutsk, Russia,
✉ absalyamovadf@rusgeology.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5602-5358>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.В. Поспеев – разработка концепции, написание черновика рукописи.
И.В. Буддо – разработка концепции, написание рукописи – рецензирование и редактирование.
Д.Ф. Абсальямова – курирование данных, написание черновика рукописи.
Alexander V. Pospeev – conceptualization, writing – original draft.
Igor V. Buddo – conceptualization, writing – review & editing.
Daria F. Absalyamova – data curation, writing – original draft.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The author declares 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 13.11.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 16.12.2024; accepted for publication 23.12.2024.



GEOPHYSICS

Original article

EDN: WRZDYU

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-389-399



Using complex low-altitude unmanned aerogeophysical survey to refine medium-scale geological maps of Bodaibo synclinorium

Valentin A. Savchenko^a✉^a*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the work is to demonstrate the possibility to clarify and correct medium-scale geological maps of precursors (scale 1:200000–1:50000) using low-altitude unmanned aerial geophysical survey which is the fastest and low-cost method of obtaining geological and geophysical data. A quantitative assessment is given to the more accurate identification of the location of geological boundaries and potential ore-bearing structures of the Sukhoi Log type. The first stage of geological study of the area involved obtaining the data from low-altitude unmanned gamma and aeromagnetic surveys. The survey results were prepared, interpolated, visualized, and, finally, subjected to geological and geophysical interpretation. Lineaments of the highest and lowest values, as well as the maximum gradients were identified in the magnetic field while the areas with the least variability at the lowest values and positive anomalies were identified in the gamma field. Interpretation and cross-comparison of the specified data allowed to compile new geological maps of the day surface and pre-Quaternary formations without any ground geological survey but based on the ideas about the geology of the region and characteristic differences in the physical properties of rocks. Taking into account regional stratigraphic and structural search criteria, two sites promising for gold mineralization were identified in the studied area. It is shown that the known geological boundaries in these areas are shifted relative to the real ones by 100–1400 m (on average by 300 m), which is a significant error both in terms of mining and drilling operation planning and general correct understanding of the geological situation. The results obtained are typical for the projects aimed at gold exploration in the Bodaibo District of the Irkutsk region. The results of the study allow to conclude that the express and inexpensive method is useful for the specification of the position of geological and promising ore-bearing structures in the area under investigation, as well as for similar areas in nearby licensed areas and other sites of the Bodaibo synclinorium.

Keywords: unmanned magnetic survey, unmanned gamma survey, lode gold, Sukhoi Log-style deposits, prospecting for ore deposits, geophysical data interpretation

Acknowledgements: The author is grateful to the colleagues from the Institute of the Siberian School of Geosciences of the Irkutsk National Research Technical University and the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS for their assistance in carrying out the research.

For citation: Savchenko V.A. Using complex low-altitude unmanned aerogeophysical survey to refine medium-scale geological maps of Bodaibo synclinorium. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):389-399. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-389-399>. EDN: WRZDYU.

ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 3179

Применение комплексной маловысотной беспилотной аэрогеофизической съемки для уточнения среднемасштабных геологических карт Бодайбинского синклинория

В.А. Савченко^a✉^a*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Резюме. Целью работы являлась демонстрация возможности объективизации и корректировки среднемасштабных (1:200000–1:50000) геологических карт предшественников с помощью наиболее быстрого и доступного метода получения геолого-геофизических данных – маловысотной беспилотной геофизической съемки. Была дана количественная оценка повышения точности фиксации положения геологических границ и потенциально рудовмещающих структур суходожского типа. На первой стадии геологического изучения площади получены данные



маловысотных беспилотных гамма- и аэромагнитной съемок. Результаты были подготовлены, проинтерполированы, визуализированы, а затем подвергнуты геолого-геофизической интерпретации. В магнитном поле выделены линеаменты наибольших и наименьших значений, а также наибольших градиентов, в гамма-поле – области наименьшей изменчивости при наименьших значениях и положительные аномалии. В результате интерпретации и перекрестного сопоставления указанных данных (без проведения наземной геологической съемки) составлены новые геологические карты дневной поверхности и дочетвертичных образований, основанные на представлениях о геологии региона и характерных различиях физических свойств горных пород. С учетом региональных стратиграфических и структурных поисковых критериев на изучаемой площади выделено два перспективных на обнаружение золотого оруденения участка. Показано, что известные геологические границы на них смещены относительно реальных на 100–1400 м (в среднем на 300 м), что является весьма существенной погрешностью как с позиции планирования горных и буровых работ, так и с позиции общего правильного понимания геологической ситуации. Полученные результаты типичны для проектов по поиску месторождений золота в Бодайбинском районе Иркутской области. Итоги исследования позволяют сделать вывод о полезности экспрессной и недорогой методики для уточнения положения геологических и потенциально рудоносных структур изучаемой площади, а также для аналогичных обстановок на близлежащих лицензионных площадях и других участках Бодайбинского синклинория.

Ключевые слова: беспилотная магниторазведка, беспилотная гамма-съемка, рудное золото, сухоложский тип, поиски рудных месторождений, интерпретация геофизических данных

Благодарности: Автор выражает признательность за помощь в проведении настоящей работы коллегам из института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета и Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН.

Для цитирования: Савченко В.А. Применение комплексной маловысотной беспилотной аэрогеофизической съемки для уточнения среднemasштабных геологических карт Бодайбинского синклинория // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 389–399. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-389-399>. EDN: WRZDYU.

Introduction

Russia, unlike many other countries, is characterized by complete state of regional geological exploration of its territory. Nevertheless, the limits of scale levels of this exploration are 1:200000, in the best case – 1:50000. In order to design and conduct modern prospecting (especially mining) works, which are usually carried out on a scale of 1:10000 and larger, the information and cartographic basis of the corresponding level is required. Since nowadays prospecting works are realized mainly in difficult areas, often remote from infrastructure, there are questions about increasing the speed and reducing the cost of the early stages of geological study of areas at the stage when the feasibility of significant expenditures on geological exploration works has not yet been confirmed. Often prospecting areas are characterized by low exposure of bedrock due to permafrost, kurum and other obstacles that make geological mapping difficult. In this regard, the reliability and accuracy of geologic boundaries on the available medium-scale maps are questionable, and additional geologic traverses may take considerable time, but do not provide a significant increase in information relative to the predecessors. The possibility of obtaining objective data on the geological structure of areas even in the absence of bedrock outcrops is provided by some methods of geophysical exploration, in particular, magnetic, gravity, radiometric. In the last 8–10 years, the technologies of unmanned geophysics (performed

with the help of unmanned aerial vehicles (UAVs)) have been rapidly developing [1–7], which make it possible to quickly and easily obtain data on areas with difficult pedestrian accessibility, at least in areas of tens of square kilometers, that is, having the size corresponding to an average licensed area. Data for such an area can be obtained in just a few days, potentially allowing hypotheses to be tested and existing information on the geologic structure of the sites to be refined with minimal financial and time investment. However, the question arises as to how fast remote geophysical methods without the organization of lengthy geological survey work can solve the problem of accurate and reliable geological mapping of new areas. In fact, it can be formulated as follows: to what extent at the early stage of geological exploration at present it is possible to do without field geologists, at least in those areas where their work is likely to be very difficult? The purpose of this study was to investigate the possibility and demonstrate the effectiveness of correcting the geological maps of the predecessors, significantly clarifying the boundaries of geological formations and structures of prospecting areas solely on the basis of remote sensing data using low-altitude UAV methods of magnetic and gamma-ray survey without any surface work. The geological conditions of the Bodaibo synclinorium, promising for the discovery of new lode gold deposits, were assessed [8–13].

The hypothesis of the study was that at the study site, as well as in the region under consider-



ation as a whole, it is possible to use detailed, fast and cheap methods of UAV geophysical surveys to clarify the geological boundaries and position of stratigraphic units and structures promising for gold mineralization without conducting on-land geological mapping. In case of successful proof of the above possibility, the early stage of geological exploration can be significantly optimized, as individual gold prospecting licenses in the area usually have an area of 20–50 km² and, due to their small size, can be surveyed using UAV methods with minimal logistics costs without any problems.

Materials and methods

The work considers a typical site within the Bodaibosynclorium, including one of the most promising geological formations of this region [11, 14], namely, the upper pack of the middle sub-formation of the Aunakit Formation. Accurate mapping of the boundaries of this unit is of primary interest for prospecting [15, 16]. For this purpose, a low-altitude UAV airborne geophysical survey (magnetometry and radiometry) was conducted in the area, the results of which were analyzed and subjected to geological-geophysical interpretation.

To perform low-altitude surveys, the SibGIS UAS complex – a multirotor-type unmanned aerial vehicle with a POS family magnetometer on the suspension and a scintillation gamma-ray radiometer was used. The characteristics of the complex and the methodology of surveying, including in the conditions of the Bodaibo region [14], are described in detail in sources [1, 7]. Let us note the most important aspects, such as the absolute character of the magnetometer channel measurement with sensitivity in hundredths of nanotesla and absence of the need for software filtering of any interference to achieve precision accuracy of measurements and surveying with precise passing round of the terrain. They allow obtaining data with the accuracy necessary for the production of detailed maps of the transformant field, so that due to the accurate height retention the obtained information-mapping materials can be correctly interpreted without additional corrections. The survey height in this case was 40 m above the ground under the magnetometer sensor (44 m under the gamma-radiometer sensor), the frequency of gamma-field dose rate measurements was

0.5 Hz, for the magnetic total field it was 2 Hz, which made it possible to obtain data with a spatial resolution of about 4–5 m for the magnetic and 15–20 m for the radiometric channels.

The methodology complied with the main provisions of the “Methodological Recommendations for Low-Altitude Aeromagnetic Survey, 2018”¹ [17], the requirement to comply with which is imposed when conducting high-precision surveys. The terrain passing round is provided by following the pre-created digital terrain model.

As a basis for geological-geophysical interpretation of the magnetic and radiometric surveys, the data of predecessors on the geological structure of the site according to the 1:50000 scale map were used (Fig. 1). Six subformations of four Upper Riphean and Vendian formations are distinguished: Aunakit (R_3au_3), Vacha ($R_3vč_1$, $R_3vč_2$), Anagra (V_1an_1 , V_1an_2), and Dogaldyn (V_1dg_1) [17]. They are represented by meta-sedimentary rocks of greenschist facies – silty and carbonaceous shales, siltstones, quartzites, sandstones and their interlayering [18]. All contacts are conformable and are distinguished by changes in the granulometric or mineral composition of rocks or in the proportions of their interbedding. The rocks deposited in compressed, almost isoclinal folds with sublatitudinal strike of steeply dipping axes. The dip of the flanks within the area ranges from 30 to 70°. According to a priori data, the thickness of the formations ranges from 100 (Vacha) to 500 (Anagra) meters.

Thus, at this site it is possible to estimate the increase of information from the use of UAV survey at the site with the maximum level of regional geological study (1:50000), while most often in the Russian practice it will be at best at the level of 1:200000.

Processing and interpretation of UAV-geophysical data was realized according to the following graph:

- making variation corrections to magnetic survey data;
- removal of service parts of routes (flights to and from the surveying area);
- interpolation and construction of digital models of initial fields;
- calculation of transformants and construction of the following set of cartographic materials: map of magnetic field values; map of magnetic

¹ Parshin A.V., Tsirel V.S., Rzhetskaya A.K. Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) – the main points and the authors' comments // GeoBaikal 2018. P. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802012>.

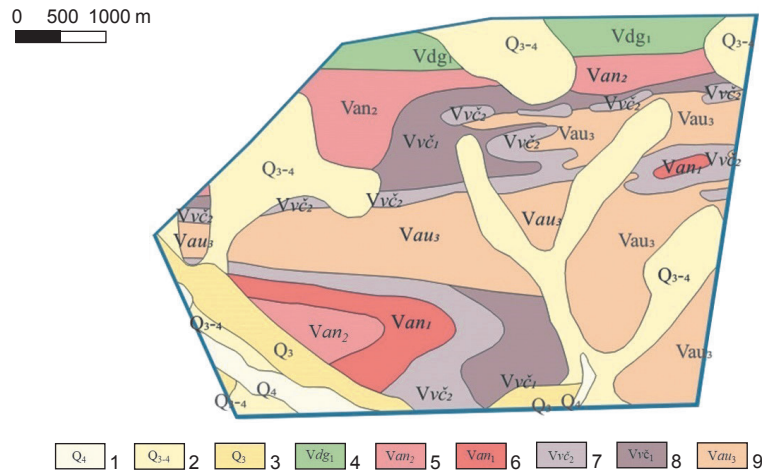


Fig. 1. Geological map of predecessors:

1 – modern alluvial sediments; 2 – glaciolacustrine sediments; 3 – glacial, aqueoglacial sediments;
4 – Dogaldyn formation, lower subformation: sandstones, beds of siltstones and shales; 5 – Anangra formation, upper subformation: sandstones, beds of shales; 6 – Anangra formation, lower subformation: interbedding of shales and sandstones; 7 – Vacha formation, upper subformation: shales, sandstone beds; 8 – Vacha formation, lower subformation: shales; 9 – Aunakit formation, upper subformation: sandstones, interbedded silty shales

Рис. 1. Геологическая карта предшественников:

1 – современные аллювиальные отложения; 2 – озерно-ледниковые отложения;
3 – ледниковые, водно-ледниковые отложения; 4 – догалдынская свита, нижняя подсвита: песчаники, прослои алевролитов и сланцев; 5 – ананграская свита, верхняя подсвита: песчаники, прослои сланцев;
6 – ананграская свита, нижняя подсвита: переслаивание сланцев и песчаников; 7 – вачская свита, верхняя подсвита: сланцы, прослои песчаников; 8 – вачская свита, нижняя подсвита: сланцы;
9 – аунакитская свита, верхняя подсвита: песчаники, прослои алевролитовых сланцев

field pseudo-relief; map of horizontal magnetic field gradient; map of gamma radiation dose rate.

In addition, a satellite image of the site and a topo map at a scale of 1:50000 were used, visualization forms were selected, and the cartographic

materials were interpreted. Figure 2 shows a map of magnetic total field values superimposed on a magnetic pseudo-relief with different azimuths of illumination corresponding to different strike of structures (visual and contrast combination).

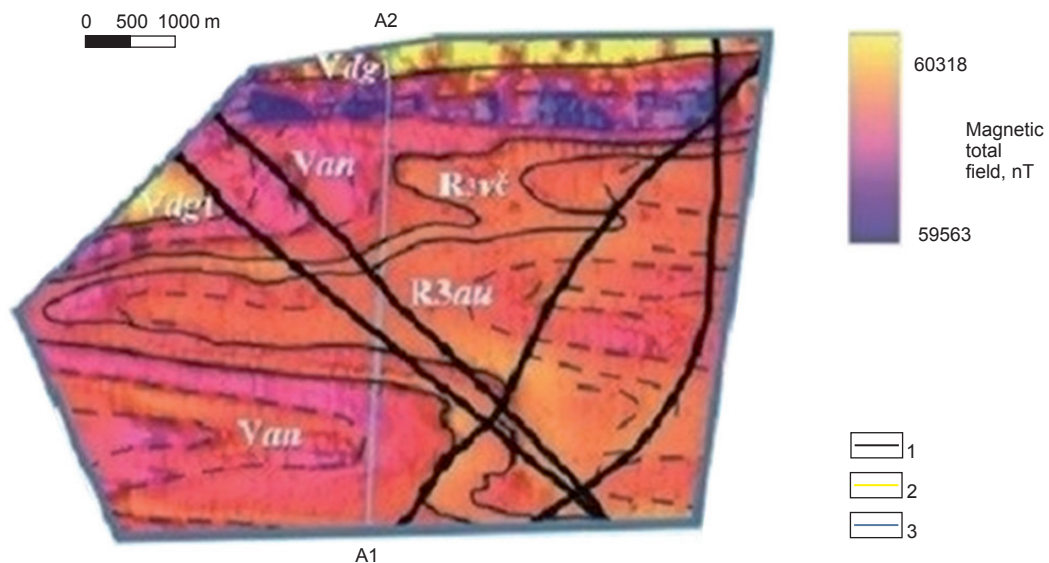


Fig. 2. Map of magnetic field anomalies with lineaments:

1 – lines of maximum gradients; 2 – lines of maximum values; 3 – lines of minimum values

Рис. 2. Карта аномалий магнитного поля с линеаментами:

1 – линии максимальных градиентов; 2 – линии максимальных значений; 3 – линии минимальных значений

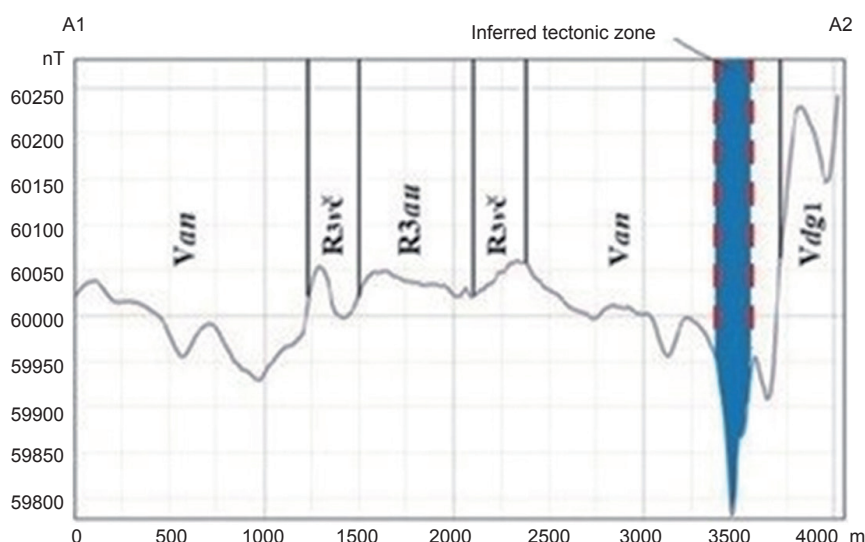


Fig. 3. Graph of the magnetic total field modulus along the profile A1–A2 with preselected value ranges

Рис. 3. График модуля напряженности магнитного поля по профилю A1–A2 с предварительно выделенными диапазонами значений

Other important sources of information were the profiles of the magnetic pseudo-relief across the structures (Fig. 3) and the map of magnetic field gradients.

As a result of comparative analysis of the available geological map and objective magnetic survey data, the vector layers of the geological map were transformed. The interpretation was based on a set of previously obtained data both on geological and petrographic parameters of formations of the area and on the results of interpretation of magnetic and radiometric survey data [1, 8–11, 14].

First of all, all lines of the largest field gradients and extremals of the largest and smallest values were drawn. According to the greatest readability, contrast and mutual complementation of these three types of lineaments, new inferred geologic boundaries were constructed. Between them, a number of lines, consistent with the assumed boundaries and, apparently, reflecting the internal structure of the folded rock layers, horizons of separate, relatively contrasting in magnetic field rock differences, were identified (Fig. 4).

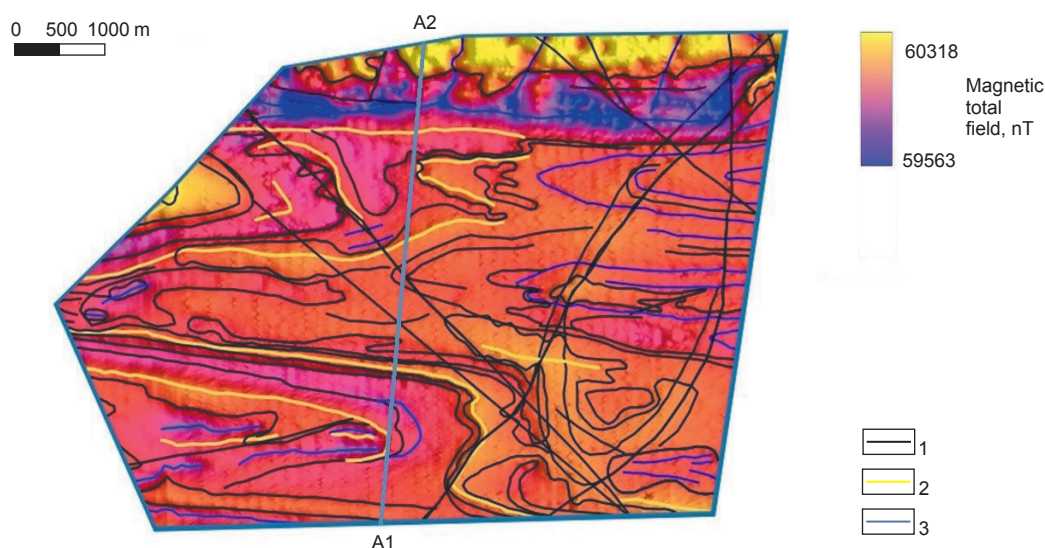


Fig. 4. Map of magnetic field anomalies with lineaments of the maximum magnetic total field gradients and extrema lines of the highest and lowest values:

1 – lines of maximum gradients; 2 – lines of maximum values; 3 – lines of minimum values

Рис. 4. Карта аномалий магнитного поля с линеаменами наибольших градиентов напряженности поля и линиями экстремумов наибольших и наименьших значений:

1 – линии максимальных градиентов; 2 – линии максимальных значений; 3 – линии минимальных значений



In the course of the study, four lines of change in values (mostly downward), gradients, and shapes of field structures partially distinguished in the relief were traced. Presumably, these are faults with displacement amplitudes that are insignificant on the map scale (when crossed, these structures do not cause visible displacements either for each other or for the selected folds). The disturbed belts, fracturing and disjunctive dislocations indicated on the map by predecessors (mostly parallel to the strike of the formations) are not detected in the magnetic field.

The magnetometric profile was used to determine the boundary values of the ranges and amplitudes of magnetic field variations (see Fig. 3) characteristic of the most reliably mapped geologic formations. The southwestern fragment of the geologic map was chosen as a reference area of this type, where, unlike other fragments, the boundaries best corresponded to the structures observed in the magnetic field and identified at the previous stage. The number of areas with a relatively monotonous field coincided with the number of mapped units, and the boundaries of the former and the latter were at a distance of up to 250 m, so the areas of the previously mapped and newly identified by magnetic data bedrock outcrops showed an overlap of 50 % or more. Based on this correspondence, the magnetic geological boundaries were delineated in the reference southwestern section and then extended to the north-northeast, where another sub-formation not observed in the south was delineated on the basis of unique values. The results of the analysis showed that the rocks of the Dogaldyn Formation are brightest in terms of the maximum values of the magnetic total field, and the rocks of the Anangra Formation are brightest in terms of the minimum values. The Aunakit and Vacha formations are distinguished by two transitional ranges.

It is important to note that this approach allows us to solve the issue of correcting the existing map, but not the problem of compiling a fundamentally new map, which is impossible, since the data that would allow us to directly reliably link the physical properties of rocks with their material composition are currently unavailable, so it is necessary to use at least the basic materials based on the results of predecessors. Such a task is also complicated by the integral character of the magnetic field, where the absolute measured value is influenced by the underlying rocks within the survey depth, which does not allow us to identify strict parameters close to petrophysical parameters [19].

The scheme of stratification was further modified. Figs 1–4 show that the width of outcrops of the Vacha Formation in the a priori map does not correspond to its proportions with the thicknesses of the overlying and underlying formations. As a result, the lower subformation of the Vacha Formation, which was identified by the predecessors as more monotonic in the magnetic field, was taken as the outcrops of the Vacha Formation proper. The upper subformation is attached to the Anangra Formation, composed of molassoids, unsorted and unconfined along strike metamorphosed clastic rocks, which in the magnetic field can also be distinguished by the greatest variability of properties: magnitudes and amplitude of changes in magnetic total field both in thickness and along strike. The upper sub-formation of the Vacha Formation, which was identified earlier, is more likely to be related to the Anangra Formation, and its subdivision has been abolished due to insufficient data to substantiate it. The ages of a number of objects marked as Lower Vendian on the existing map were also corrected: the Aunakit and Vacha formations belong to the Upper Rhiphean, while the Anangra and Dogaldyn formations belong to the Lower Vendian [17, 20].

The gamma-field map (Fig. 5) was compared with the geological map of the predecessors, made on the basis of magnetic data of the new map of pre-Quaternary formations, as well as with a satellite image of the license area to identify and verify the formations defined in the gamma-field.

Among the pre-Quaternary formations, the Aunakit Formation of the Upper Rhiphean, which is promising for the target type of mineralization and which rocks are rich in potassium-bearing mica that determines its increased radioactivity due to the ^{40}K isotope [14], stands out most clearly in the gamma field due to its higher exposure than in other units (Fig. 6).

According to the minimum gamma-field values, the distribution fields of the most powerful Quaternary lake-glacial sediments, which overlap the bedrock and shield ionizing radiation from them, were determined. The other formations are not contrasted in the gamma field due to overlapping of different genetic types of Quaternary sediments and lower content of radioactive elements. Also, due to imaging at altitude, local gamma-activity anomalies from very thin (tens to first meters or less in thickness) structures – complications of folding of multiple orders characteristic of the regional geological situation – are smoothed out, which does not allow their reliable mapping.

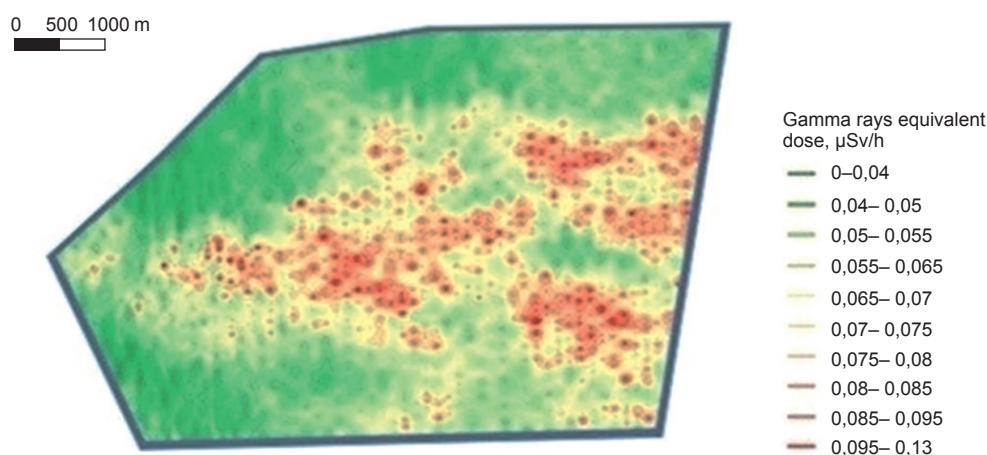


Fig. 5. Gamma field map
Рис. 5. Карта гамма-поля

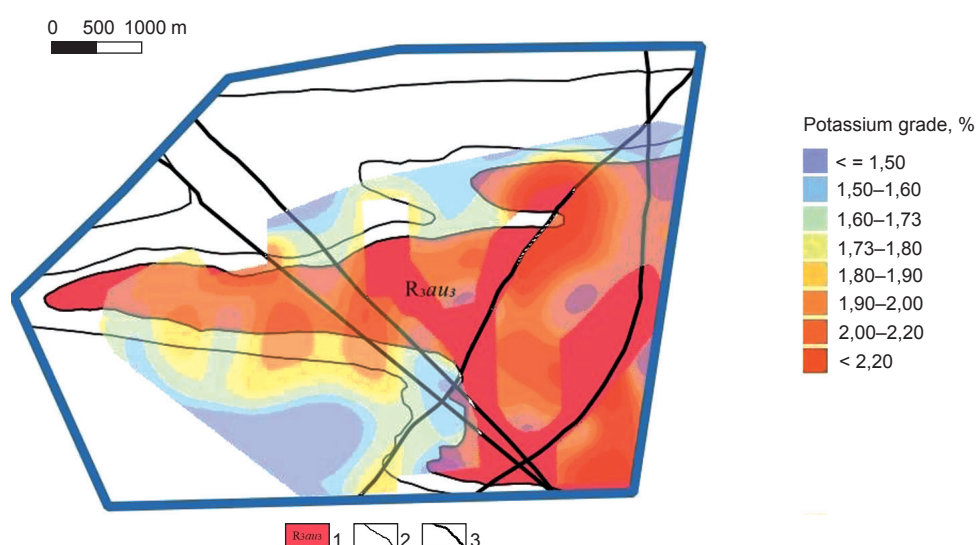


Fig. 6. Potassium anomalies in comparison with the newly identified boundary of the Aunakit formation:

1 – Aunakit formation, upper subformation: sandstones, beds of silty shales;
 2 – geological boundaries of other units; 3 – suspected faults

Рис. 6. Аномалии калия в сравнении со вновь выделенной границей аунакитской свиты:

1 – аунакитская свита, верхняя подсвита: песчаники, прослои алевроитовых сланцев;
 2 – геологические границы других подразделений; 3 – предполагаемые разрывные нарушения

Results and discussion

Based on the identification of outcrops of magnetically contrasting and monotonic rocks, comparison of geophysical data with each other and with the geological map of the predecessors, bringing the areas with certain ranges of magnetic properties in accordance with specific rock differences in the area with the best convergence of magnetic and previously mapped geological formations, new geological boundaries were drawn over the entire study area. As a result of the interpretation, a map of pre-Quaternary formations with inferred faults and a geologic map of the daylight surface were constructed.

The new geologic model agrees better than the previous one with the ideas about the struc-

tural geology of the area – the relationships between the geologic boundaries of the rocks of the conformable sequence have been corrected, the width of outcrops has been corrected taking into account the known maximum thicknesses of the observed layers [17]. In addition, smaller magnetically contrasting structures (packs) were identified within the mapped formations, which provides additional information on the internal structure of folded metasedimentary ore-bearing strata in case of the transition to the next stage of geological exploration. The Sukhoi Log-style of gold mineralization is characterized by confinement to the contacts of not only formations, but also their sub-formations and separate packs, so that geometrization of smaller geological bodies



significantly increases the efficiency of detailed prospecting and evaluation.

Fig. 7 shows the comparison of the geologic map of the predecessors and the geologic

map corrected during the presented research. The green rectangle indicates the reference area where the magnetic field lineaments and the boundaries of stratigraphic units were compared

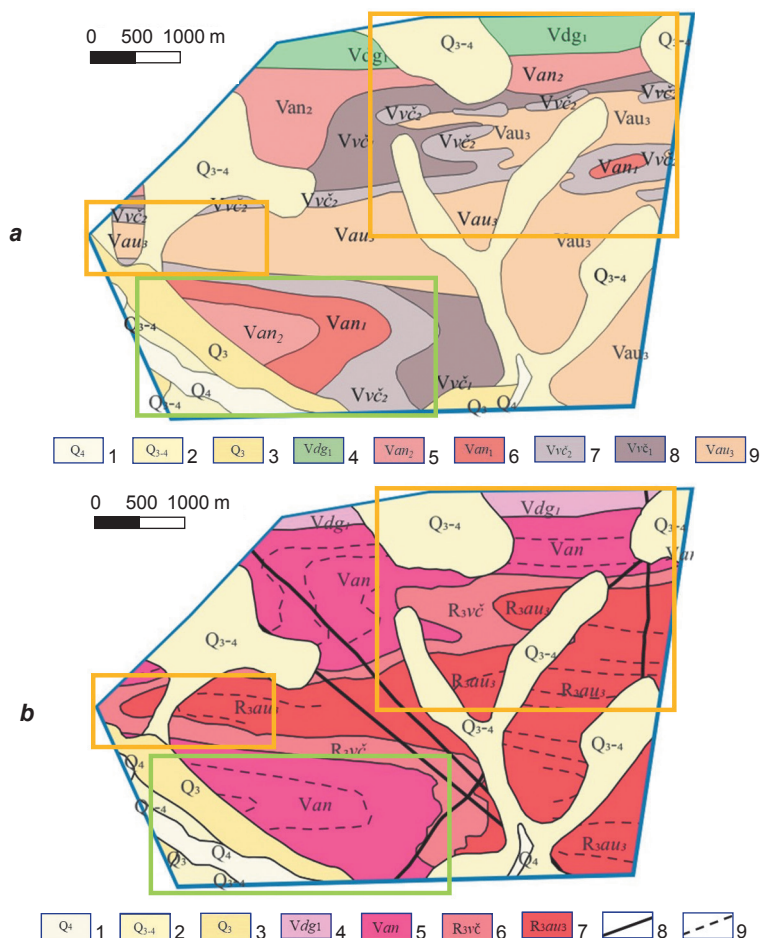


Fig. 7. Comparison of geological maps based on the interpretation results of unmanned aerial surveys (with the lines of the largest magnetic field gradients):

a – predecessors map: 1 – modern alluvial sediments, 2 – glaciolacustrine sediments, 3 – glacial, aqueoglacial sediments, 4 – Dogaldyn formation, lower subformation: sandstones, beds of siltstones and shales, 5 – Anangra formation, upper subformation: sandstones, beds of shales, 6 – Anangra formation, lower subformation: interbedding of shales and sandstones, 7 – Vacha formation, upper subformation: shales, interbedded sandstones, 8 – Vacha formation, lower subformation: shales, 9 – Aunakit formation, upper subformation: sandstones, interbedded silty shales; b – final map: 1 – modern alluvial sediments, 2 – glaciolacustrine sediments, 3 – glacial, aqueoglacial sediments, 4 – Dogaldyn formation, lower subformation: sandstones, beds of siltstones and shales, 5 – Anangra formation: interbedding of shales and sandstones, 6 – Vacha formation: shales, interbedded sandstones, 7 – Aunakit formation, upper subformation: sandstones, interbedded silty shales, 8 – suspected faults, 9 – lines of the greatest magnetic field gradients

Рис. 7. Сопоставление геологических карт по результатам интерпретации беспилотной съемки (с линиями наибольших градиентов магнитного поля):

а – карта предшественников: 1 – современные аллювиальные отложения, 2 – озерно-ледниковые отложения, 3 – ледниковые, водно-ледниковые отложения, 4 – догалдынская свита, нижняя подсвита: песчаники, прослои алевролитов и сланцев, 5 – анангская свита, верхняя подсвита: песчаники, прослои сланцев; 6 – анангская свита, нижняя подсвита: переслаивание сланцев и песчаников, 7 – вачская свита, верхняя подсвита: сланцы, прослои песчаников, 8 – вачская свита, нижняя подсвита: сланцы, 9 – аунакитская свита, верхняя подсвита: песчаники, прослои алевролитовых сланцев;

б – итоговая карта: 1 – современные аллювиальные отложения, 2 – озерно-ледниковые отложения, 3 – ледниковые, водно-ледниковые отложения, 4 – догалдынская свита, нижняя подсвита: песчаники, прослои алевролитов и сланцев, 5 – анангская свита: переслаивание сланцев и песчаников, 6 – вачская свита: сланцы, прослои песчаников, 7 – аунакитская свита, верхняя подсвита: песчаники, прослои алевролитовых сланцев, 8 – предполагаемые разрывные нарушения, 9 – линии наибольших градиентов магнитного поля



in priority. The discrepancies between the original and corrected boundaries here are minimal compared to the rest of the area, the distances between them are from 0 to 240 m, on average – 100 m. The orange rectangles show the areas where the new boundaries were shifted most significantly, from 100 to 1400 m, with an average of 300 m. The importance of this reassessment is supplemented by the fact that these map fragments meet both stratigraphic and structural exploration criteria for the target type of mineralization, and their location was shifted by up to 1 km, which is critical for the planning of further prospecting.

Conclusion

The results obtained in the course of the study show the possibility and expediency of using express and inexpensive methods of UAV-geophysics at the early stage of geological exploration. Based on the comparison of available medium-scale geological materials and objective UAV magnetic and gamma-ray data, it was possible to map pre-Quaternary rocks, faults, and Quaternary sediments. The detailed UAV magnetic aerial survey made it possible to correct the geo-

logic map and the position of prospective structural and compositional complexes, and the UAV gamma survey made it possible to identify the distribution fields of the most thick Quaternary sediments and the boundaries of outcrops of the promising Aunakit Formation.

Thus, low-altitude UAV geophysical methods make it possible to quickly and inexpensively obtain detailed objective data about the site, which can be used to clarify the geological structure of the area, identify prospective zones and make decisions about moving to the next stage of exploration. The features used for this purpose are universal for the regional geological situation and are applicable to other license areas within the Bodaibo synclinorium. The importance of this type of work is confirmed by the fact that the location of actual geological boundaries may differ from their cartographic representation on 1:50000 scale maps by a distance of up to 1–1.5 km, in connection with which the planning of expensive ground surveys without preliminary objectivization of geological maps would definitely lead to significant costs or even the failure of the prospecting project due to the omission of prospective settings.

References

1. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografia i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
2. Jackisch R., Madriz Y., Zimmermann R., Pirttijärvi M., Saartenoja A., Heincke B.H., et al. Drone-borne hyperspectral and magnetic data integration: Otanmäki Fe-Ti-V deposit in Finland. *Remote Sensing*. 2019;11(18):2084. <https://doi.org/10.3390/rs11182084>.
3. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Y., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S., et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(5):2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>.
4. Karaoulis M., Ritsema I., Bremmer Ch., De Kleine M., Oude Essink G., Ahlrichs E. Drone-borne electromagnetic (DR-EM) surveying in the Netherlands: lab and field validation results. *Remote Sensing*. 2022;14(21):5335. <https://doi.org/10.3390/rs14215335>.
5. Døssing A., Kolster M.E., Rasmussen T.M., Petersen J.T., da Silva E.L.S. UAV-towed scalar magnetic gradiometry: a case study in relation to iron oxide copper-gold mineralization, Nautanen (Arctic Sweden). *Leading Edge*. 2023;42(2):103-111. <https://doi.org/10.1190/tle42020103.1>.
6. Shahsavani H., Smith R.S. Aeromagnetic gradiometry with UAV, a case study on small iron ore deposit. *Drone Systems and Applications*. 2024;12(1):1-9. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0126>.
7. Parshin A., Budyak A., Bulnaye V., Morozov V., Sapunov V., Chebokchinov I. Complex UAS-geophysical surveys at the first stages of geological prospecting: case in the Western Sayan (Russia). In: *1st EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles*. 02–04 December 2019, Toulouse. Toulouse, 2019, p. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903321>.
8. Goryachev N.A., Budyak A.E., Mikhaliysyna T.I., Tarasova YU.I., Goryachev I.N., Sotskaya O.T. Evolution of orogenic gold mineralization in the southern and eastern framing structures of the Siberian craton. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):374-389. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: HXQZHE.
9. Buriak V.A., Khmelevskaya N.M. Sukhoi Log - one of the largest gold deposits in the world (genesis, patterns of mineralization distribution, forecasting criteria). Vladivostok: Dalnauka; 1997, 156 p. (In Russ.).
10. Zhmodik S.M., Kulikov A.A., Shestel' S.T. Gold distribution in Vitim-Patom black shales. *Geologiya i geofizika*. 1993;34(2):67-76. (In Russ.).
11. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands):



constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

12. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*. 2022;144:104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>.

13. Ivanov A.I. *Baikal-Patom gold (Geology, Mineralization, and Prospects)*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Basic and Precious Metals; 2014. 215 p. (In Russ.).

14. Parshin A., Budyak A., Babyak V. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: a case of additional flank exploration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;459:052079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079>.

15. Buryak V.A. Metamorphic-hydrothermal economic gold ore style. Novosibirsk: Nauka; 1975, 48 p. (In Russ.).

16. Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova Yu.I., Budyak A.E. New data on the geological and structural features of the Ozhereliye, Ykanskoye, Ugahan and Golets Vysochaishy gold fields. *Earth science and subsoil use*. 2019;42(4):388-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.

17. Ivanov A.I., Livshits V.I., Perevalov O.V., Strakhova T.M., Yablonovskii B.V. Precambrian of the Patom Upland. Moscow: Nedra; 1995, 352 p. (In Russ.).

18. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N., Mitrofanov G.L. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2004;24(1-2):7-44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>.

19. Kokodey D.Yu., Bukhalov S.V., Davidenko Yu.A., Gurevich D.V. Approbation of a measuring device with direct contact for measuring the electrical resistivity and polarization parameters of samples from the "Krasivoye" and "Osenniy" porphyry type deposit. In: GeoBaikal 2022: sbornik materialov 7-i nauchno-prakticheskoi konferentsii = GeoBaikal 2022: collected materials of the 7th scientific and practical conference. 27 February – 3 March 2023, Irkutsk. Moscow: EAGE Geomodel'; 2023, p. 233-236 (In Russ.).

20. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2022;64(7):503-512. <https://doi.org/10.1134/s1075701522070108>.

Список источников

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

2. Jackisch R., Madriz Y., Zimmermann R., Pirttijärvi M., Saartenoja A., Heincke B.H., et al. Drone-borne hyperspectral and magnetic data integration: Otanmäki Fe-Ti-V deposit in Finland // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Iss. 18. P. 2084. <https://doi.org/10.3390/rs11182084>.

3. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Y., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S., et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 5. P. 2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>.

4. Karaoulis M., Ritsema I., Bremmer Ch., De Kleine M., Oude Essink G., Ahlrichs E. Drone-borne electromagnetic (DR-EM) surveying in the Netherlands: lab and field validation results // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Iss. 21. P. 5335. <https://doi.org/10.3390/rs14215335>.

5. Døssing A., Kolster M.E., Rasmussen T.M., Petersen J.T., da Silva E.L.S. UAV-towed scalar magnetic gradiometry: a case study in relation to iron oxide copper-gold mineralization, Nautanen (Arctic Sweden) // Leading Edge. 2023. Vol. 42. Iss. 2. P. 103–111. <https://doi.org/10.1190/tle42020103.1>.

6. Shahsavani H., Smith R.S. Aeromagnetic gradiometry with UAV, a case study on small iron ore deposit // Drone Systems and Applications. 2024. Vol. 12. Iss. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0126>.

7. Parshin A., Budyak A., Bulnayev A., Morozov V., Sapunov V., Chebokchinov I. Complex UAS-geophysical surveys at the first stages of geological prospecting: case in the Western Sayan (Russia) // 1st EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles (Toulouse, 02–04 December 2019). Toulouse, 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903321>.

8. Горячев Н.А., Будяк А.Е., Михалицына Т.И., Тарасова Ю.И., Горячев И.Н., Соцкая О.Т. Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах южного и восточного обрамления Сибирского кратона // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 374–389. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: HXQZHE.

9. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.

10. Жмодик С.М., Куликов А.А., Шестель С.Т. Распределение золота в черных сланцах Витимо-Патомского района // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 2. С. 67–76.

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



12. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 144. P. 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>.
13. Иванов А.И. Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). М.: Изд-во ЦНИГРИ. 2017. 215 с.
14. Parshin A., Budyak A., Babyak V. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: a case of additional flank exploration // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. P. 052079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079>.
15. Буряк В.А. Метаморфогенно-гидротермальный тип промышленного золотого оруденения. Новосибирск: Наука, 1975. 48 с.
16. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.
17. Иванов А.И., Лившиц В.И., Перевалов О.В., Страхова Т.М., Яблоновский Б.В. Докембрий Патомского нагорья. М.: Недра, 1995. 352 с.
18. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N., Mitrofanov G.L. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2004. Vol. 24. Iss. 1–2. P. 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>.
19. Кокодей Д.Ю., Бухалов С.В., Давыденко Ю.А., Гурвич Д.В. Апробация установки с прямым контактом для измерения удельного электрического сопротивления и поляризационных параметров образцов с месторождения порфирового типа «Красивое» и «Осенний» // *ГеоБайкал 2022: сб. материалов 7-й науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 27 февраля – 3 марта 2023 г.)*. М.: Изд-во ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2023. С. 233–236.
20. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia // *Geology of Ore Deposits*. 2022. Vol. 64. Iss. 7. P. 503–512. <https://doi.org/10.1134/s1075701522070108>.

Information about the author / Информация об авторе



Valentin A. Savchenko,
Research Engineer,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ vsavchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-4915-1051>
Савченко Валентин Андреевич,
инженер-исследователь,
институт «Сибирская школа Геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ vsavchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-4915-1051>

Contribution of the author / Вклад автора

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The author declares no conflicts 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 06.03.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 12.12.2024.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 12.12.2024.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК 550.370+556
EDN: KXUIBU
DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-400-416



Методика применения электротомографии при поиске подземных вод в условиях распространения многолетнемерзлых пород на примере Бодайбинского района Иркутской области

Т.С. Шойхонова^{a,✉}, М.С. Шкиря^b, П.Г. Бирюков^c

^{a,c} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. В настоящее время в связи с растущим спросом на новые объекты водоснабжения возникает необходимость поиска новых источников подземных вод. Поскольку бурение скважин отличается высокой стоимостью и имеет экологические риски, актуальным становится применение геофизических методов, в частности электроразведки. Электротомография позволяет детально изучить геологическое строение и свойства водоносных горизонтов, однако четкие рекомендации для проведения электротомографических исследований при поиске подземных вод в различных геологических условиях отсутствуют. Для повышения точности и эффективности геофизических работ предлагается выполнение математического моделирования данных электротомографии, позволяющего оценить чувствительность метода и возможные ошибки измерений, а также обеспечить наиболее точные результаты. Целью проведенного исследования являлось формирование оптимальной методики поиска подземных вод посредством электротомографии в условиях распространения многолетнемерзлых пород в Бодайбинском районе, включающей рассмотрение возможных условий залегания подземных вод и математическое моделирование для оценки влияния мерзлых пород на полученные данные. Численное моделирование подтвердило эффективность использования указанного метода в районах, осложненных многолетнемерзлыми породами. Обводненные трещиноватые зоны, характеризующиеся пониженными значениями удельного электрического сопротивления, надежно идентифицировались на всех полученных данных моделирования. Результаты решения прямых и обратных задач электроразведки, сопоставленные с данными производственных работ 2020 г. в Республике Бурятия и 2022 г. в Иркутской области, показали, что электротомографические исследования, успешно подтвержденные бурением, позволяют с высокой достоверностью выделить продуктивный обводненный горизонт.

Ключевые слова: электротомография, численное моделирование, подземные воды, многолетнемерзлые породы

Для цитирования: Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г. Методика применения электротомографии при поиске подземных вод в условиях распространения многолетнемерзлых пород на примере Бодайбинского района Иркутской области // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 400–416. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-400-416>. EDN: KXUIBU.

GEOPHYSICS

Original article

Methodology of using electrical tomography in groundwater exploration in permafrost conditions on example of Bodaibo district, Irkutsk region

Tuyana S. Shoykhonova^{a,✉}, Mikhail S. Shkiryayev^b, Pavel G. Biryukov^c

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

Abstract. Growing current demand for new water supply sources determines the need to search for new sources of groundwater. Since well drilling is expensive and environmentally risky, it is becoming relevant to use geophysical methods, in particular electrical exploration. Electrical resistivity tomography allows a detailed study of geological structure and properties of aquifers, but there are no clear recommendations for conducting electrical resistivity tomography studies when searching for groundwater in various geological conditions. To improve the accuracy and efficiency of geophysical works, it is proposed to perform mathematical modeling of electrical resistivity tomography data, which allows to assess the method sensitivity and possible measurement errors as well as to ensure the most accurate results. The purpose of the conducted study is to develop an optimal technique for groundwater exploration using electrical resistivity tomography in the conditions of permafrost.

© Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г., 2024



distribution in the Bodaibo district. The technique takes into consideration possible groundwater occurrence conditions and includes mathematical modeling to assess the impact of permafrost on the data obtained. Numerical modeling has proved the efficiency of the method in permafrost areas. Water-flooded fractured areas characterized by low values of specific electrical resistance have been reliably identified in all obtained modeling data. The results of solving direct and inverse problems of electrical exploration compared with the data of production works performed in 2020 in the Republic of Buryatia and in 2022 in the Irkutsk region have shown that electrical tomographic studies, which were successfully confirmed by drilling, make it possible to identify a productive water-flooded horizon with a very high degree of confidence.

Keywords: electrical resistivity tomography, numerical modeling, groundwater, permafrost

For citation: Shoykhonova T.S., Shkirya M.S., Biryukov P.G. Methodology of using electrical tomography in groundwater exploration in permafrost conditions on example of Bodaibo district, Irkutsk region. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):400-416. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-400-416>. EDN: KXUIBU.

Введение

В настоящее время проблема обеспечения водой для промышленных и бытовых нужд – одна из наиболее актуальных в России и других странах мира. В связи с ростом населения и увеличением потребления возникла необходимость поиска новых источников подземных вод. В особенности данная проблема затрагивает Иркутскую область, которая является одним из ведущих регионов, обладающих значительным промышленным потенциалом. В связи с активной разработкой и открытием большого количества золоторудных месторождений в Бодайбинском районе (например, Сухой Лог), актуальной задачей является строительство горно-обогатительных комбинатов, требующих значительных объемов воды, используемых как в процессе производства, так и для обеспечения бытовых нужд рабочего персонала.

Несмотря на то что бурение скважин является традиционным методом поиска и добычи подземных вод, высокая стоимость и потенциальные экологические риски заставляют искать альтернативные методы. Комплекс геолого-разведочных работ, включающий геофизические исследования, становится все более востребованным при решении гидрогеологических задач. Геофизика позволяет получить предварительную информацию о геологическом строении, наличии или отсутствии водоносных горизонтов, минимизируя количество буровых работ и сокращая затраты на этапе поисково-оценочных работ [1].

Среди всех геофизических методов одним из часто применяемых при разведке подземных вод является электроразведка, в частности метод электротомографии [2, 3]. Он используется в различных геологических обстановках благодаря возможности детального расчленения разреза по параметру удельного электрического сопротивления (УЭС) [4], однако требования к указанной методике, кото-

рые могли бы регламентировать необходимый масштаб и детальность съемки при поиске подземных вод в той или иной геологической ситуации, на данный момент отсутствуют.

Для достижения максимальной эффективности и минимизации затрат перед проведением геофизических работ необходимо провести моделирование, то есть решить прямую и обратную задачи. Оно выполняется для оценки эффективности и целесообразности применения в текущей геологической обстановке выбранного геофизического метода при поиске объекта изучения [5]. Решение прямой и обратной задач электроразведки позволит лучше понять принципы работы многоэлектродных методик, изучить чувствительность и разрешающую способность различных установок к заданной модели среды [6], а также заранее предсказать возможные помехи и ошибки измерений, в итоге повысив точность и надежность полученных результатов [7].

Таким образом, проведенное исследование было направлено на формирование оптимальной методики на начальном этапе поиска подземных вод методом электротомографии в условиях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) на примере Бодайбинского района Иркутской области посредством математического моделирования с целью обеспечения водными ресурсами объектов промышленности и населенных пунктов. Задачами являлись определение возможных условий залегания подземных вод в условиях распространения ММП и выполнение математического моделирования для оценки влияния распространения ММП на данные, полученные методом электротомографии при поиске обводненных трещиноватых зон.

Материалы и методы исследования

Бодайбинский район территориально относится к Байкало-Патомскому нагорью, рас-



положенному в пределах северо-восточной части Сибирской платформы в Забайкалье [8] и представляющему собой уникальный геологический объект, отличающийся сложным тектоническим строением и разнообразным минеральным составом. В его пределах сформировано Светловское рудное поле, которое является одним из наиболее перспективных золоторудных районов России.

Байкало-Патомское нагорье – крупная морфоструктура на севере Байкальской горно-складчатой системы. Его основными орографическими элементами являются гольцовые массивы и короткие хребты, ориентированные в различных направлениях. Внутренняя часть нагорья, вытянутая в северо-восточном направлении, понижена (Чая-Жуинская депрессия) и отличается от окружающей территории меньшими абсолютными и относительными высотами. В морфологии и строении речных долин отмечаются чередование узких порожистых, крутосклонных участков с расширенными заболоченными, нередко террасированными (р. Витим, Мама, Большая Чуя, Большой Патом, Жуя и др.) участками, наличие переуглубленных долин, особенно характерное для внутренней депрессии. Нагорье сложено преимущественно докембрийскими образованиями, представленными архейскими гнейсами и метаморфическими породами, перекрытыми рифей-вендскими осадочными толщами.

В районе исследований рифей-вендские осадочные отложения формируют Маракано-Тунгусскую сложную синклиналь, часть Мамско-Бодайбинского синклинория, которая формирует основную структуру Светловского рудного поля, сложенного осадочно-метаморфизованными отложениями ныгринской и бодайбинской серий. Разрез характеризуется чередованием углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных формаций, разделенных на три серии: балаганахскую, ныгринскую и бодайбинскую. Залегание пород согласное, переходы постепенные. Породы, залегающие в пределах территории, подвергались региональному метаморфизму: на большей части наблюдается серицит-хлоритовая субфация зеленосланцевой фации, а в западной (бассейн р. Маракан) и восточной (бассейн р. Большой Тунгуски) – биотит-хлоритовая субфация зеленосланцевой фации и эпидот-амфиболитовая (зона граната, дистена) фация.

Рассмотренный в ходе проведенной работы участок относится к провинции ММП в Саяно-Байкальской горноскладчатой зоне и Витимо-Патомском нагорье [9]. Для данной области характерно крупное островное распространение ММП в эрозионных долинах, сложенных мощной толщей аллювиальных и ледниковых отложений. Максимальная мощность мерзлоты в этом районе достигает 100 м (рис. 1).

ММП в долинах рек Витимо-Патомского нагорья имеют островной характер. Мерзлыми являются в основном рыхлые отложения, мощность которых составляет 20–60 м, достигая иногда 140–150 м (долина руч. Тахтыкан-Берикан в системе р. Энгажимо).

В гидрогеологическом отношении нагорье является типичным криогидрогеологическим массивом [9]. Выделяются поровые и порово-пластовые воды рыхлых отложений, трещинно-пластовые и трещинно-карстовые воды осадочно-метаморфических пород, трещинно-жильные воды зон тектонических нарушений в метаморфических и изверженных породах. На площадях развития ММП выделяются надмерзлотные и подмерзлотные воды большинства перечисленных видов. Наибольшей водообильностью обладают горизонты и комплексы трещинно-карстовых и трещинно-жильных вод.

Территория исследованного участка отличается сложным строением, что обусловлено наличием водоупорных массивов метаморфических пород, разбитых тектоническими зонами дробления. Метаморфические породы прорваны интрузиями гранитов, в пределах которых образована водоносная зона трещиноватости. Сверху метаморфические и магматические породы частично перекрыты рыхлыми аллювиальными и моренными (флювиогляциальными) образованиями. На склонах и водоразделах толща пород проморожена на значительную глубину. В соответствии с гидрогеологическим районированием участок находится в границах Нечеро-Жуинского артезианского бассейна Витимо-Патомской гидрогеологической складчатой области [8]. На рассматриваемой площади выделяются следующие гидрогеологические подразделения:

- водоносный комплекс современных и четвертичных отложений;
- водоносная зона трещиноватости протерозойских метаморфизованных пород.

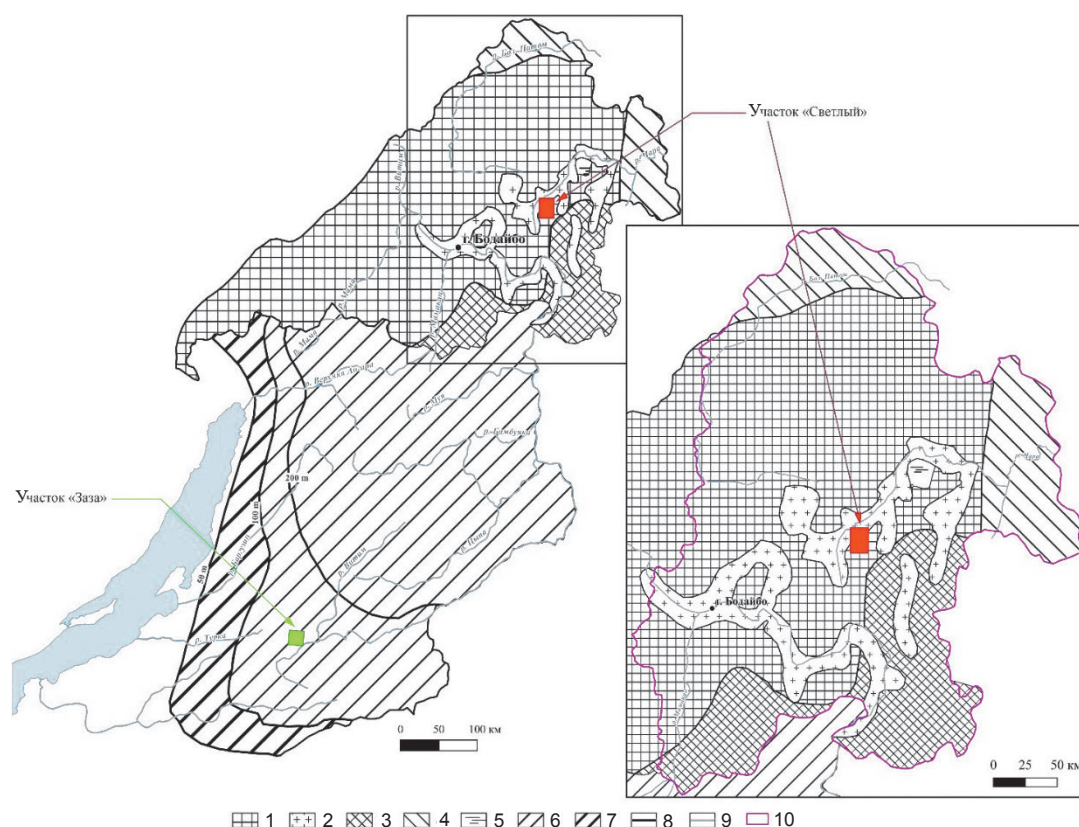


Рис. 1. Ситуационный план распространения многолетнемерзлых пород района исследования [8, 9]:

1 – область с массивами многолетнемерзлых пород и островами таликов в средне- и высокогорной части; 2 – область с крупными островами многолетнемерзлых пород в древних эрозионных долинах, сложенных мощной толщей аллювиальных и ледниковых отложений; 3 – область сплошного распространения многолетнемерзлых пород в гольцово-таежной части с редкими небольшими таликами под крупными озерами и руслами рек; 4 – область многолетнемерзлых пород с крупными спорадическими таликами; 5 – крупные заболоченные массивы; 6 – область сплошного распространения многолетнемерзлых пород с мощностью до 200 м в долинах; 7 – переходный тип распространения многолетнемерзлых пород (от островного к сплошному); 8 – изолинии максимальных мощностей многолетнемерзлых пород (в отрицательных формах рельефа, в метрах); 9 – реки; 10 – контур Бодайбинского района

Fig. 1. Site plan of permafrost rock distribution in the area under investigation [8, 9]:

1 – area with permafrost massifs and talik islands in the mid- and high-altitude part; 2 – area with large islands of permafrost rocks in ancient erosive valleys composed of the thick layers of alluvial and glacial deposits; 3 – area of continuous distribution of permafrost rocks in the bold mountain-taiga part with rare small taliks under large lakes and riverbeds; 4 – area of permafrost rocks with large sporadic taliks; 5 – large swamped massifs; 6 – area of continuous distribution of permafrost rocks with the thickness of up to 200 m in valleys; 7 – transitional type of permafrost distribution (from insular to continuous); 8 – isolines of maximum permafrost thickness (in negative relief forms, in meters); 9 – rivers; 10 – Bodaibo district contour

Водоносный комплекс современных и нерасчлененных четвертичных отложений включает в себя как надмерзлотные воды, так и воды таликов. Водоносная зона трещиноватости протерозойских метаморфизованных пород включает в себя подмерзлотные воды. Согласно гидрогеологическому описанию, полученному по результатам изысканий на соседних участках (например, Леприндо (порядка 11 км на запад)), основные запасы сосредоточены:

– в подрусловых таликах в четвертичных отложениях, распространенных вдоль водотоков

(участок работ – р. Жуя и ее притоки); мощность обводненных четвертичных отложений по фоновым данным составляет в среднем 10–20 м, они располагаются в таликовых зонах, простирающихся на удаление до 200 м от русла;

– в зонах повышенной трещиноватости протерозойских отложений, наиболее выраженных непосредственно под нижней границей многолетней мерзлоты, что связано с многократными ее изменениями; мощность трещиноватых зон варьирует от 10 до 50 м (по данным бурения скважин на соседних месторождениях подземных вод).



Моделирование является важным этапом планирования полевых геофизических работ, так как позволяет оценить применимость выбранных геофизических методов для решения поставленной геологической задачи, определить оптимальные параметры измерений, а также спрогнозировать уровень сигнала и разрешающую способность системы наблюдений [10]. Решение прямых задач с помощью математического моделирования позволяет определить аномальные параметры физических полей по известным геометрическим характеристикам и физическим свойствам объекта [11]. Верификация результатов осуществляется путем решения обратной задачи, которая заключается в определении геометрических параметров по полученным геофизическим данным. Процесс решения обратной задачи включает преобразование результатов прямой задачи к входным данным программы инверсии и последующее получение геоэлектрического разреза. Результаты инверсии сравниваются с исходной моделью.

В поисково-оценочных работах, осуществляемых при разведке подземных вод, часто используется электроразведка методами сопротивлений, основанная на различии в УЭС горных пород, что позволяет надежно картировать обводненные зоны, характеризующиеся низкими значениями сопротивления [12]. Электротомография – метод, объединяющий принципы зондирования и профилирования и позволяющий получить детальную информацию о приповерхностных отложениях мощностью в первые сотни метров [13], в основе которого лежит принцип введения электрического тока в землю через систему электродов, расположенных на поверхности, и последующего измерения возникающего электрического потенциала [14]. Различия в значениях электрического сопротивления различных типов пород, их влажности, солености и других физических свойств позволяют создать детальную картину геологического строения.

Математическое моделирование осуществлялось в программном комплексе ZondRes2D. Входными данными являлись такие изменяемые параметры, как геометрические размеры объектов, их мощность, глубина залегания целевого объекта и значения УЭС.

Для инверсии данных электротомографии в ZondRes2D используются два основных ал-

горитма – Оссам [15] и Focused [16]. Их выбор обусловлен эффективностью и способностью решать специфические задачи моделирования, которые связаны с получением гладких и интерпретируемых моделей. Указанные алгоритмы эффективно справляются с задачей, минимизируя количество резких переходов в модели, которые могут быть вызваны шумом в данных или неоднозначностью интерпретации. Кроме того, Оссам и Focused обладают устойчивостью к шуму в данных и позволяют получать решения, согласующиеся с геологическими представлениями.

Помимо использованных при решении прямых и обратных задач алгоритмов инверсии, в программном обеспечении ZondRes2D используются также Marquardt [17], Blocks [18], Smoothness constrained [19], однако в процессе исследования было принято решение не применять их в связи с некоторыми особенностями алгоритмов. Так, Marquardt, эффективный для решения нелинейных задач, не обладает сильными свойствами регуляризации, что может привести к получению результирующих моделей с резкими переходами и большей вероятностью возникновения артефактов инверсии, следовательно, к сложности в их интерпретации. Blocks ориентирован на поиск блочных моделей, что в подавляющем большинстве геологических ситуаций невозможно. Кроме того, алгоритм требует большого количества итераций для поиска решения, что делает процесс ресурсозатратным. Smoothness constrained менее гибкий и может оказаться неэффективным, если требуется учесть априорную информацию о геологии. Недостатками выбранных для проведения исследования алгоритмов можно назвать возникновение слишком гладких моделей при использовании процедуры Оссам, которые не отражают детали геологии, и ресурсозатратность Focused, особенно при обработке больших наборов данных.

В процессе моделирования применялись комбинированные прямая и обратная трех-электродные установки, а также установка Шлюмберже. Первые, имея высокую помехоустойчивость, обеспечивают максимальную глубинность и разрешающую способность среди стандартных. Вторая, демонстрируя одинаковую чувствительность к горизонтальным и вертикальным границам, представляет собой компромиссный вариант между дипольной и установкой Веннера. Ее глубинность



превосходит установку Веннера на 10 %, при этом обеспечивая среднее горизонтальное покрытие [20]. Кроме того, установка Шлюмберже использовалась как контрольная для заверки результатов моделирования трехэлектродной установкой.

В качестве подтверждения эффективности применения указанного метода при поиске подземных вод в работе использовались два практических примера. Первый – результаты электроразведочных работ, проводившихся в 2020 г. в Еравнинском районе Республики Бурятия на участке работ «Заза» с целью поиска подземных вод при строительстве горно-обогатительного комбината «Озерный» [21]. Объем выполненных работ составил 6 профилей общей протяженностью 4600 м. Применялась комбинированная трехэлектродная установка с выносным электродом Тх на расстоянии 1 км. Расстояние между электродами составило 5 м, выходное напряжение – 204 В, продолжительность импульса тока – 80 мс, паузы – 20 мс. При проведении электротомографии в Республике Бурятия использовалась 16-канальная электроразведочная станция «Скала-64». Вторым практическим примером являются электротомографические исследования, направленные на поиск вод технического водоснабжения при стро-

ительстве горно-обогатительного комбината «Светловский», проводились в 2022 г. в Бодайбинском районе Иркутской области [22]. В условиях ограниченного объема работ было выполнено четыре профиля общей длиной 1210 м. При исследовании использовалась 15-канальная аппаратура «Скала 64К15». Выходное напряжение составляло 200 В, продолжительность импульса тока – 100 мс, паузы – 20 мс. Отсчеты брались на следующих временах: 120, 140, 160 мс.

Результаты исследования и их обсуждение

За основу для выполнения математического моделирования были взяты геологический профиль и материалы ранее проведенных электроразведочных работ в Бодайбинском районе [22]. В результате изучения литературных источников и имеющихся данных были составлены три упрощенные геоэлектрические модели, состоящие из трех слоев: первый – верхние четвертичные отложения, включающие в себя супеси и суглинки с включениями мелкообломочного материала со значениями УЭС 300 Ом·м; второй слой – перекрывающие их супеси с включением крупнообломочного материала до валунов со значениями УЭС 1000 Ом·м; третий – плотные известняки со значениями УЭС 3000 Ом·м (рис. 2). Целе-

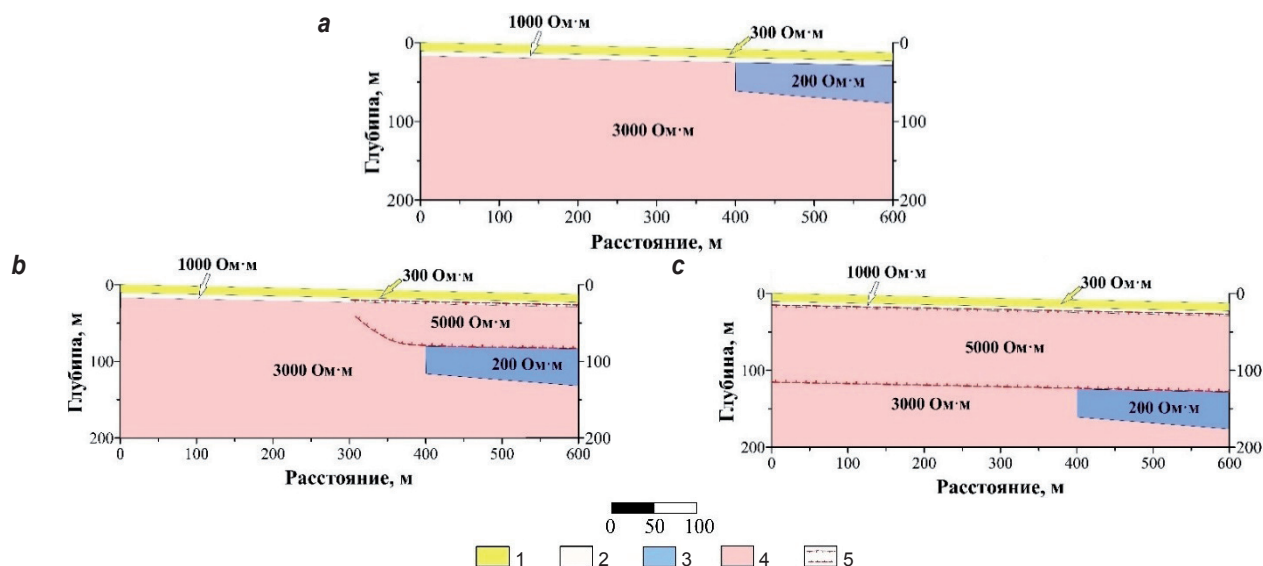


Рис. 2. Упрощенные геологические модели с отсутствием многолетнемерзлых пород (а), с наличием прерывистой (б) и сплошной (с) зоны многолетнемерзлых пород:

1 – мелкообломочные супеси/суглинки; 2 – крупнообломочные супеси/валуны;
3 – обводненная трещиноватая зона; 4 – известняки плотные; 5 – зона многолетнемерзлых пород

Fig. 2. Simplified geological models without permafrost rocks (a), with discontinuous (b) and continuous (c) permafrost areas:

1 – fine detrital sandy loams/loams; 2 – coarse sandy loams/boulders;
3 – water-flooded fractured zone; 4 – dense limestones; 5 – permafrost area



вым объектом являлась обводненная трещиноватая зона (ОТЗ), представленная трещиноватыми известняками со значениями УЭС 200 Ом·м (см. рис. 2, а), расположенная под вторым слоем.

На следующем этапе моделирования был введен такой фактор, как ММП. Для второй модели (см. рис. 2, б) геологический разрез был осложнен прерывистыми ММП, в то время как третья (см. рис. 2, с) характеризовалась наличием сплошных ММП. Значение УЭС для зоны ММП в этих двух моделях – 5000 Ом·м. В обеих моделях (см. рис. 2, б, с) искомый объект расположен под толщей ММП.

Первым этапом при непосредственной работе в ZondRes2D являлось задание начальных параметров геометрии установки: количество электродов – 64, сдвиг электроразвешенной косы на 32 электрода относительно исходного положения. Шаг между пикетами был равен 10 м, общая длина профиля – 630 м (составляет одну полную раскладку приемных кос аппаратуры «Скала 64К15»). Оптимальная длина профиля обусловлена достаточной разрешающей способностью метода с учетом преобладания на территории малогабаритных целевых объектов. Инверсия для комбинации прямой и обратной трехэлектродных установок выполнялась до глубины 150 м. Максимальная глубинность исследования для установки Шлюмберже составила 100 м.

Параметрами, которые менялись при моделировании, являлись:

- геометрия объектов, в частности мощность с вариативностью 20 и 50 м, а также длина 100, 200 м и сплошной слой по профилю под слоем сплошных ММП (длина – 630 м);
- вариативность значений мощности прерывистых ММП (50 и 100 м);
- значение УЭС ММП (3200, 3500, 4000 и 5000 Ом·м).

Варианты значений УЭС ММП брались согласно априорным данным, полученным в результате полевых наблюдений в Республике Бурятия с учетом теоретических значений для моделирования [23]. Вариативность изменений значений сопротивления ММП часто бывает обусловлена их температурой, наличием льда, а также геологической обстановкой [24].

Всего было построено 40 моделей с различными комбинациями параметров сопротивления, мощностей объекта и типов ММП.

Среднеквадратическое отклонение между синтетическими и полученными по результатам моделирования данными составило 0,5 %. Результаты, полученные в ходе решения прямой задачи электротомографии, были заверены путем решения обратной задачи, и на основании конечных данных сделаны четыре блока выводов.

В первом блоке рассматривалась возможность выделения обводненной трещиноватой зоны при наличии слоя сплошных или прерывистых ММП. Для этого были проведены численные расчеты для моделей, представленных на рис. 2, б, с, после чего сделаны выводы. Для модели, изображенной на рис. 2, с, где слой ММП является сплошным, были рассмотрены варианты с размерами объекта 20×200 и 50×200 м, а также сплошным слоем ОТЗ. Результаты решения обратной задачи показали, что применение трехэлектродной установки позволяет определить наличие обводненной зоны всех рассмотренных вариантов. Применение же установки Шлюмберже изначально оценивалось как неэффективное при условии наличия слоя сплошных ММП с мощностью 100 м, так как ограничения установки по глубине исследования составило 100 м (рис. 3). Выполненное моделирование для модели, представленной на рис. 2, б (где присутствует прерывистый слой ММП), показало, что используемые установки позволяют выделить объект любых размеров (от 20×100 до 50×200 м), за исключением варианта модели с мощностью ММП 100 м и размерами 20×100 м, где объект на разрезе проявлен слабо.

УЭС ММП на разрезах, полученных в результате моделирования, характеризуется повышенными значениями. Например, при сопротивлении, равном 5000 Ом·м, ММП выделяются на результирующих разрезах максимальными значениями УЭС, заданными в ПО в настройках инверсии при выборе диапазона значений сопротивления.

Второй блок выводов посвящен особенностям выделения ОТЗ на геоэлектрических разрезах при отсутствии ММП (см. рис. 2, а). Для данной модели рассматривались объекты, размеры которых составляли 20×100 м (а также объект размером 50×200 м), которые опускали на глубину 50 м относительно их начального расположения в заданных моделях. Установлено, что объект любых размеров из применяемых в текущем моделировании

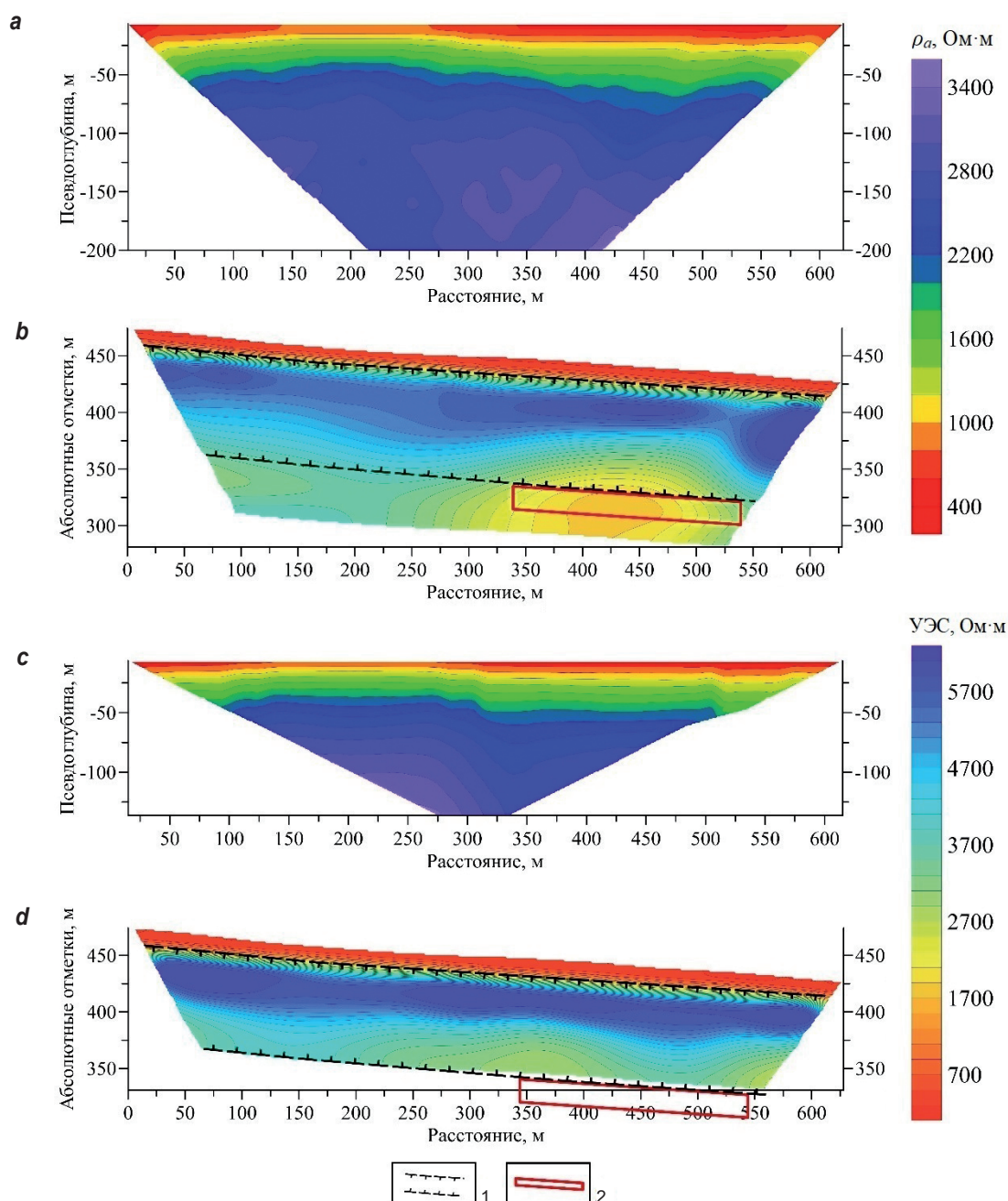


Рис. 3. Результаты решения прямой и обратной задач электроразведки для трехэлектродной установки (а, б) и установки Шлюмберже (с, д) при условии, что размеры объекта составляют 20×200 м, мощность сплошных многолетнемерзлых пород – 100 м:
1 – многолетнемерзлые породы; 2 – контур объекта

Fig. 3. Results of solving direct and inverse electrical exploration problems for a three-electrode installation (а, б) and Schlumberger installation (с, д) provided that dimensions of the object are 20×200 m, continuous permafrost rock thickness is 100 m:
1 – permafrost rocks; 2 – object contour

(от 20×100 до 50×200 м) ярко контрастирует по параметру УЭС на фоне вмещающих пород, что позволяет уверенно его оконтурить (рис. 4). Если он небольшой (20×100 м), то на фоне вмещающих высокоомных пород аномалия на разрезе отображается большими размерами, чем сам объект, поэтому при геологической интерпретации можно

определить геометрию объекта. Объекты же размером 50×200 м хорошо локализируются, отображаемая мощность на разрезах составляет порядка 50–55 м (при заданной 50 м).

В третьем блоке выводов описывается возможность определения мощности слоя ММП и обводненной трещиноватой зоны. На всех

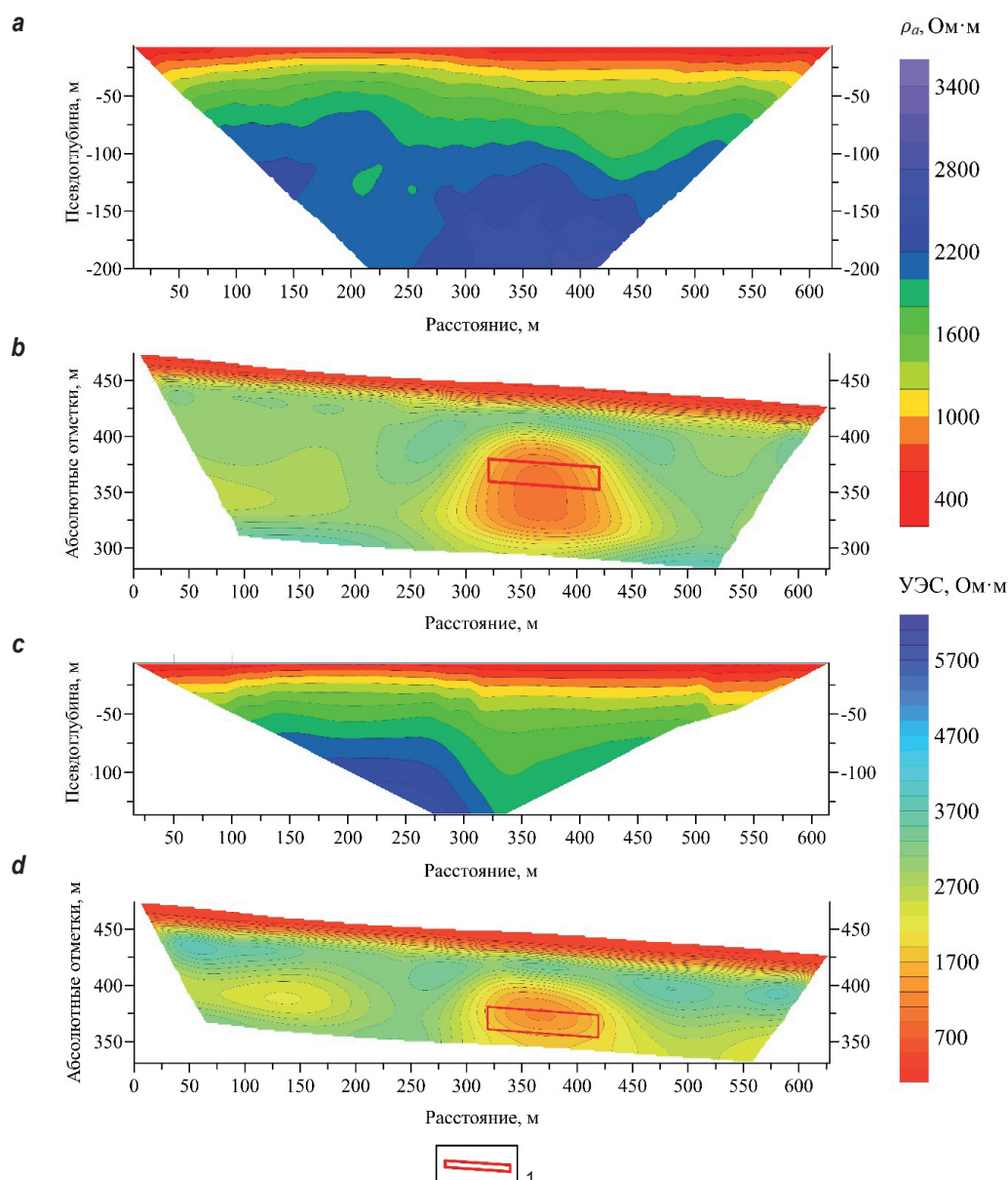


Рис. 4. Результаты решения прямой и обратной задач электроразведки для трехэлектродной установки (а, б) и установки Шлюмберже (с, д) при условии, что объект 20×100 м опущен на 50 м относительно начально заданной глубины, диапазон удельного электрического сопротивления – 10–4000 Ом·м:

1 – контур объекта

Fig. 4. Results of solving the direct and inverse electrical exploration problems for the three-electrode installation (a, b) and Schlumberger installation (c, d) provided that 20×100 m object is lowered by 50 m relative to the initially specified depth, the range of electrical resistance is 10–4000 Ohms·m:

1 – object contour

разрезах мощность и прерывистых, и сплошных ММП (при наличии объекта под подошвой слоя ММП) отмечается меньшими, чем изначально заданные, размерами, в некоторых случаях отображаясь вполуполовину меньше под объектом. Пределы изменения значений мощности ММП представлены от 35 до 25 м для заданной (50 м) и от 70 до 35 м при мощности ММП, составляющей 100 м. Чем больше размеры ОТЗ, расположенного под подошвой

ММП, тем меньше размеры расположенных над объектом ММП. У края разреза по инверсии толща ММП отражается своей заданной мощностью, но при интерпретации реальных полученных в результате наблюдения данных есть большая вероятность неверного истолкования рассматриваемой картины (так называемый краевой эффект) (рис. 5, б, д).

В заключительном блоке выводов анализировались параметры оптимизации геоме-

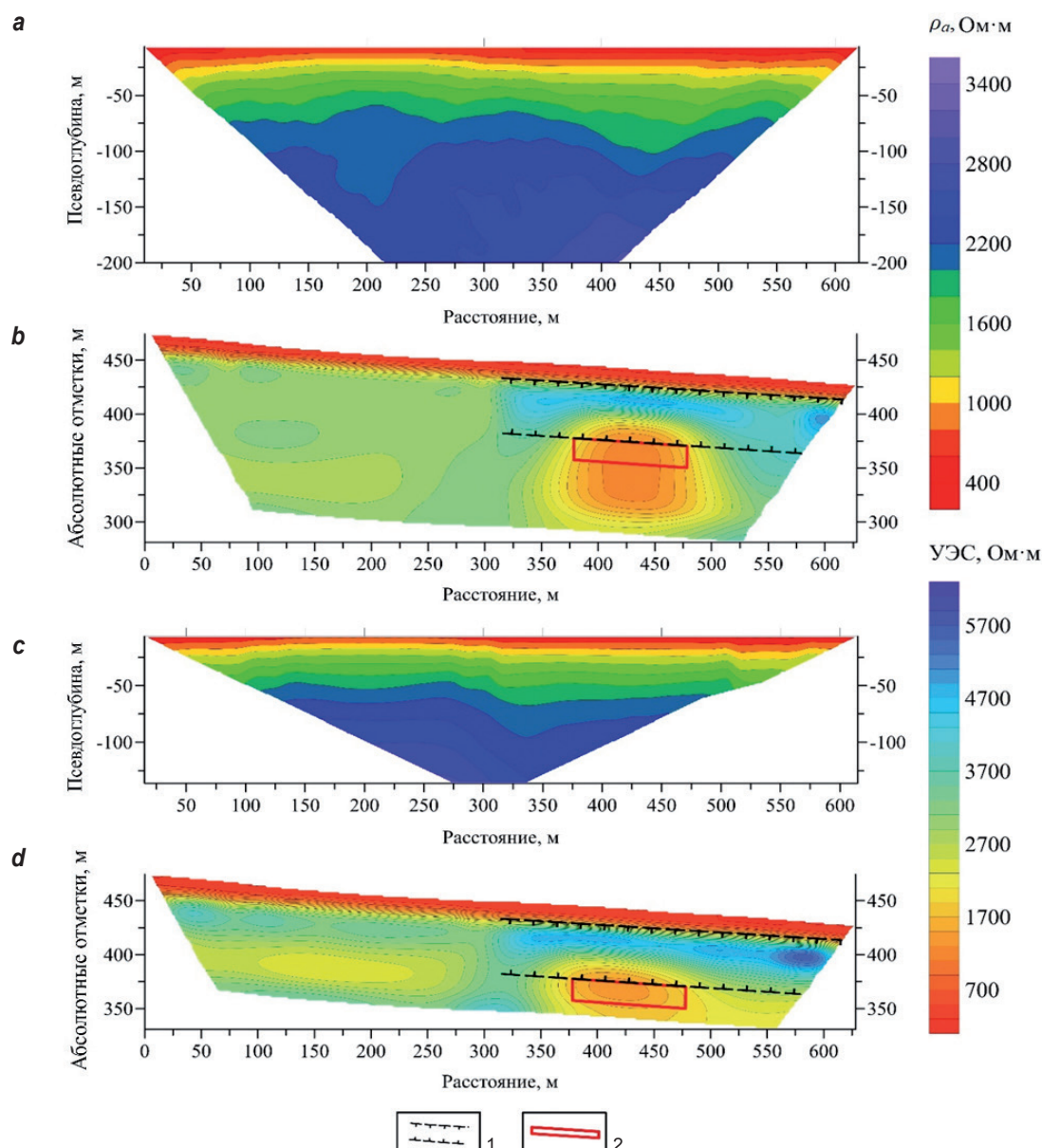


Рис. 5. Результаты решения прямой и обратной задач электроразведки для трехэлектродной установки (а, б) и установки Шлюмберже (с, д), при условии, что размеры объекта составляют 20×100 м, удельное электрическое сопротивление многолетнемерзлых пород – 4000 Ом·м):

1 – многолетнемерзлые породы; 2 – контур объекта

Fig. 5. Results of solving the direct and inverse electrical exploration problem for a three-electrode installation (a, b) and Schlumberger installation (c, d), provided that object dimensions are 20×100 m, electrical resistivity of permafrost rocks is 4000 Ohms·m:

1 – permafrost rocks; 2 – object contour

трической конфигурации установки электротомографии (трехэлектродная комбинированная и установка Шлюмберже). Математическое моделирование с вариацией геометрических параметров и учетом осложняющего фактора в виде ММП позволило установить корреляционную зависимость между геометрией установки и точностью результатов обратного решения (инверсии) между собой на предмет эффективности применения в данной геологической ситуации.

На разрезах, полученных по результатам моделирования трехэлектродной установкой, обводненные трещиноватые зоны уверенно выделяются. Однако стоит отметить, что мощность ОТЗ превышает изначально заданные значения, тем самым способствуя неверному определению глубины залегания и мощности объекта при геологической интерпретации. На разрезах, полученных по результатам моделирования установкой Шлюмберже, появляются ложные аномальные объ-



екты (артефакты инверсии), что также может привести к неверному истолкованию геологической ситуации. Для подтверждения гипотезы о том, что количество итераций напрямую влияет на изменение размеров объекта и появление ложных аномалий, проведено дополнительное исследование, в ходе которого было установлено, что при малом количестве итераций (1–2) алгоритм не обнаруживает решения. С большим количеством итераций (начиная с 3), помимо появляющегося на разрезах искомого объекта, появляется и артефакт инверсии. С увеличением размера ОТЗ аномалия от ложного объекта увеличивается. На разрезах, полученных по результатам моделирования трехэлектродной установкой, вмещающие породы не отображаются однородным массивом по параметру УЭС. Причина, вероятно, заключается в значительной разнице по значениям сопротивлений между целевым объектом и вмещающими горными породами (см. рис. 5). При работах, проводимых методом электротомографии, данную особенность необходимо учитывать в процессе геологической интерпретации.

Установлено, что при наличии высокоомного перекрывающего экрана (ММП) нижележащие слои характеризуются более высокими значениями УЭС, чем в действительности. Данный эффект отмечен на всех разрезах, полученных по результатам моделирования. Несмотря на небольшие размеры объектов (20×100 м), контрастные относительно вмещающей среды характеризуются более высокими значениями УЭС, чем изначально заданные в параметрах модели. При интерпретации данных, полученных в ходе полевых работ, необходимо учитывать, что реальные значения УЭС горных пород будут ниже, чем значения УЭС, являющиеся результатом инверсии. Более точный интервал значений сопротивлений можно получить по данным геофизических исследований скважин или лабораторных исследований физических параметров образцов горных пород.

Рассмотрим в качестве примера результат инверсии данных электротомографии с участка в Бодайбинском районе [22]. Искомая обводненная зона отобразилась на разрезах со значениями УЭС 400 Ом·м, в то время как по данным каротажа значение УЭС трещиноватых известняков варьировалось в пределах 200 Ом·м. Вероятно, что значения УЭС вмещающих пород ниже, чем полученные по результатам инверсии наблю-

денных данных электротомографии, так как по данным моделирования у всех слоев в результате решения обратных задач отмечаются завышенные значения УЭС по сравнению с заданными по данным геофизических исследований скважин. На основании этого установлено, что геологическую интерпретацию данных электротомографии допустимо выполнять на качественном уровне, так как завышение значений УЭС наблюдается по всему исследуемому разрезу.

В качестве второго примера разберем практический опыт применения электротомографии при поиске и оценке подземных вод в Еравнинском районе Республики Бурятия [21]. На рис. 6, *d* показан результат инверсии по одному из профилей. По данным электротомографии отчетливо выделяется толща ММП в верхней части разреза мощностью от 10 до 50 м и характеризующаяся значениями УЭС, составляющими 1000–1200 Ом·м. В результате опытно-фильтрационных работ [25] и поисково-оценочного бурения был вскрыт продуктивный комплекс нижнемеловых отложений на глубине 117,5 м, вскрытая мощность которого составила 82,5 м [26]. Обводненные породы представлены сильнотрещиноватыми переслаивающимися отложениями аргиллитов, песчаников и алевролитов. При геологической интерпретации данных электротомографии было установлено и подтверждено математическим моделированием (см. рис. 6, *b*), что вмещающие породы не отображаются в разрезе как однородная среда. В данном примере они представлены переслаивающимися отложениями песчаников и алевролитов. Неоднородное распределение значений по параметру УЭС вмещающих пород и продуктивного горизонта связано с влиянием контрастных по УЭС объектов (ММП и ОТЗ). В данном случае местоположение поисково-оценочной скважины задавалось по комплексу геологических, гидрогеологических и геофизических данных. Низкоомная зона (см. рис. 6, *d*) в интервале от 600 до 950 м вероятнее всего характеризует ОТЗ и наиболее приближена к ее истинным значениям по параметру УЭС. Разброс значений сопротивлений продуктивного комплекса в диапазоне от первых Ом·м до первых сотен Ом·м связан с глубиной залегания кровли ОТЗ, варьирующейся по мощности перекрывающей толщи ММП, а также особенностями используемых математических алгоритмов инверсии.

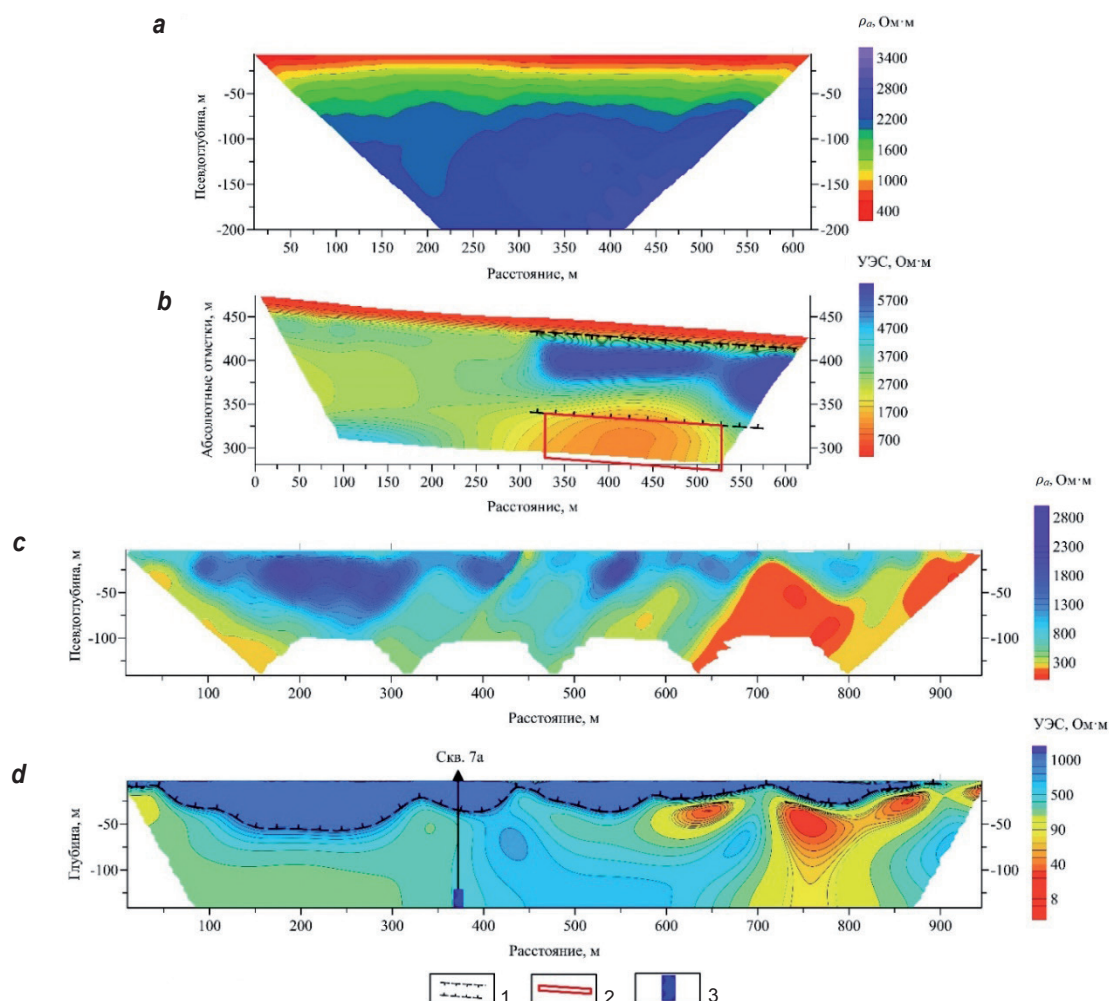


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования с результатами полевых работ 2020 г. на Еравнинской площади с применением трехэлектродной установки:

a – результат решения прямой задачи электроразведки; b – результат решения обратной задачи электроразведки; c – разрез по параметру кажущегося сопротивления; d – разрез по параметру удельного электрического сопротивления на основе решения двумерной обратной задачи электроразведки

1 – многолетнемерзлые породы; 2 – контур объекта; 3 – обводненный интервал

Fig. 6. Comparison of simulation results and results of field works conducted in 2020 on Yeravninskaya area using a three-electrode installation:

a – result of solving the direct problem of electrical exploration; b – result of solving the inverse problem of electrical exploration; c – section by apparent resistivity parameter; d – section by specific electrical resistance parameter based on the solution of a two-dimensional inverse problem of electrical exploration

1 – permafrost rocks; 2 – object contour; 3 – water-flooded interval

Закключение

В рамках проведенного исследования были рассмотрены три различные модели расположения подземных вод в зависимости от типа распространения ММП. Значения УЭС вмещающей толщи известняков и многолетнемерзлой толщи были выбраны на основании априорных данных, полученных в результате полевых наблюдений в Республике Бурятия и на основе табличных значений. Всего было построено 40 моделей с различными комбинациями параметров сопротивления, мощностей объекта и типом ММП.

В первом наборе моделей слой ММП отсутствовал. В данном случае обводненная трещиноватая зона контрастно выделялась на фоне высокоомных вмещающих пород. При наименьших моделируемых размерах искомого объекта (20×100 м) решение обратной задачи дает искаженное представление о таких его качественных параметрах, как размер и значение УЭС, завышая их в 4–5 раз. При увеличении размера объекта точность определения качественных параметров линейно возрастает.

Второй набор моделей включает высокоомный приповерхностный слой, характеризую-



ющий сплошное распространение ММП, присутствие которых в качестве осложняющего фактора в данной геологической обстановке повышает точность определения геометрических параметров ОТЗ в исследуемой среде по сравнению с полным отсутствием этого слоя. Такая особенность связана со сглаживающими параметрами алгоритма инверсии. Наличие в исследуемом разрезе как низкоомного, так и высокоомного объектов позволяет используемому математическому алгоритму инверсии компенсировать широкий диапазон распределения сопротивлений и сохранить контрастные границы между объектами. Тем не менее при наличии высокоомного перекрывающего экрана (ММП) значения УЭС нижележащих слоев завышаются на 600–800 Ом·м. Данный эффект был отмечен на всех разрезах, полученных в результате моделирования.

Третий набор моделей характеризовался прерывистым распространением многолетнемерзлой толщи. На разрезах, полученных по результатам моделирования трехэлектродной установкой, обводненные трещиноватые зоны уверенно выделяются. В то же время стоит отметить, что мощность объекта превышает изначально заданные значения, тем самым способствуя неверному определению глубины залегания и мощности объекта при геологической интерпретации. На разрезах, полученных по результатам моделирования установкой Шлюмберже, появляются ложные аномальные объекты (артефакты инверсии), что также может привести к неверному истолкованию геологической ситуации.

По результатам проведенных работ было установлено, что комбинированная прямая и обратная трехэлектродная установка является наиболее информативной для определения геометрических параметров ММП и выделения обводненных трещиноватых зон Бодайбинского района. Рекомендовано применение шага между электродами, составляющего 10 м.

Эффективность применения описанной выше методики была подтверждена результатами наземных электротомографических работ, проводившихся в 2020 г. в долине р. Зазы, и исследований, которые велись в 2022 г. в долине р. Жуи. На основе решения двумерной обратной задачи электроразведки были оконтурены перспективные водонасыщенные участки, характеризующиеся низкими значениями УЭС. На участке работ в долине р. Зазы четко выделялись зоны обводненных разломов с трещинно-жильными подмерзлотными водами, наличие которых было заверено последующими бурением и опытно-фильтрационными работами.

Предложенная методика может быть использована в сходных геологических условиях. Водонасыщенные трещиноватые зоны проявляются в геоэлектрических разрезах в виде пониженных значений УЭС на фоне высокоомных вмещающих пород. Присутствие многолетнемерзлой толщи может быть причиной искажений геометрических параметров искоемых объектов и их значений УЭС в результатах процедуры инверсии, что необходимо учитывать при геолого-гидрогеологической интерпретации.

Список источников

1. Шкиря М.С., Ланкин Ю.К., Терешкин С.А., Лазурченко А.В., Давыденко Ю.А. Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 160–170. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3766>. EDN: EKMNKE.
2. Thiagarajan S., Rai S.N., Kumar D., Manglik A. Delineation of groundwater resources using electrical resistivity tomography // Arabian Journal of Geosciences. 2018. Vol. 11. Iss. 9. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3562-y>.
3. Санчаа А.М., Фаре А.Н., Шемелина О.В. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 10. С. 90–105. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-90-105>. EDN: RFYERA.
4. Kumar D., Rao V.A., Sarma V.S. Hydrogeological and geophysical study for deeper groundwater resource in quartzitic hard rock ridge region from 2D resistivity data // Journal of Earth System Science. 2014. Vol. 123. Iss. 3. P. 531–543. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0408-1>.
5. Белова А.Ю., Башкеев А.С., Давыденко Ю.А., Зайцев С.В., Ольховский И.В., Гулин В.Д. Оценка чувствительности электроразведочных БПЛА-систем для решения инженерно-геологических задач // Инженерная и рудная геофизика 2023: сб. материалов 19-й науч.-практ. конф. и выставки (г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г.). СПб.: Изд-во ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2023. С. 485–491. EDN: MZBOOV.



6. Бурденко А.А., Бобачев А.А. Трехмерное моделирование электрических полей от тел произвольной формы методом интегральных уравнений // *Геоэвразия-2024. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес: сб. трудов VII Междунар. геол.-геофиз. конф. (г. Москва, 12–14 марта 2024 г.)*. Тверь: Изд-во ООО «ПолиПРЕСС», 2024. С. 297–300. EDN: BZIHLY.
7. Башкеев А.С. Трофимов И.В., Бухалов С.В., Давыденко Ю.А., Паршин А.В., Прохоров Д.А. [и др.]. Оценка чувствительности технологии БПЛА-МПП с двумя вариантами генераторного контура (петля и линия) на примере объектов палеодолитного типа // *Инженерная и рудная геофизика 2023: сб. материалов 19-й науч.-практ. конф. и выставки (г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г.)*. СПб: СПб.: Изд-во ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2023. С. 492–500. EDN: CRXZCF.
8. Ткачук В.Г., Иванилова Р.Ф., Иванов И.Н. *Гидрогеология СССР. Т. XIX. Иркутская область*. М.: Недра, 1968. 496 с.
9. Шевченко В.К., Лахтина О.В., Хазанов В.С., Труш Н.И., Боярский О.Г., Максимова Л.Н. [и др.]. *Геокриология СССР. Горные страны юга СССР*. М.: Недра, 1989. 358 с.
10. Tso C.H.M., Kuras O., Wilkinson P.B., Uhlemann S., Chambers J.E., Meldrum Ph.I., et al. Improved characterisation and modelling of measurement errors in electrical resistivity tomography (ERT) surveys // *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 146. P. 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.009>.
11. Рыскин М.И. Физико-геологическое моделирование как основа геологической интерпретации комплекса геофизических данных // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Науки о Земле»*. 2014. Т. 14. № 1. С. 87–96. EDN: TBRYRV.
12. Alshehri F., Abdelrahman K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography // *Journal of King Saud University – Science*. 2021. Vol. 33. Iss. 5. P. 101468. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101468>.
13. Куликов В.А., Бобачев А.А., Яковлев А.Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300–400 м // *Геофизика*. 2014. № 2. С. 39–46. EDN: SECXBL.
14. Ducut Ju.D., Alipio M., Go Ph.J., Concepcion Il R., Vicerra R.R., Bandala A., et. al. A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection // *Displays*. 2022. Vol. 73. P. 102208. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102208>.
15. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. 1987. Vol. 52. Iss. 3. P. 289–300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.
16. Portniaguine O., Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images // *Geophysics*. 1999. Vol. 64. Iss. 3. P. 874–887. <https://doi.org/10.1190/1.1444596>.
17. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963. Vol. 11. Iss. 2. P. 431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.
18. Olayinka A.I., Yaramanci U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion // *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 45. Iss. 2. P. 63–81. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00019-7).
19. Englert A., Kemna A., Zhu J.F., Vanderborght J., Vereecken H., Yeh T.C.J. Comparison of smoothness-constrained and geostatistically based cross-borehole electrical resistivity tomography for characterization of solute tracer plumes // *Water Science and Engineering*. 2016. Vol. 9. Iss. 4. P. 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.01.002>.
20. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Опыт применения электротомографии в геофизике // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54–63. EDN: RZDIMJ.
21. Лазурченко А.В., Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Белова А.Ю., Терешкин С.А. Оценка возможности поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами (на примере территории восточной части Республики Бурятия) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 7. С. 81–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4348>. EDN: OIUUYI.
22. Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г., Дунюшин А.А., Башкеев А.С. Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 6. С. 14–25. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/6/4301>. EDN: ATZVUU.
23. Ефремова Д.Н., Оленченко В.В., Горевячева А.А. Двумерная геоэлектрическая модель широтной зональности многолетнемерзлых толщ // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 3. С. 102–107. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-102-107>. EDN: PIWRJD.
24. Захаренко В.Н., Краковецкий Ю.К., Парначев В.П., Попов Л.Н. Об электропроводности многолетнемерзлых горных пород // *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 359. С. 182–187. EDN: OZOSEJ.
25. Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью // *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 116–124. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>. EDN: NNSOYJ.
26. Шкиря М.С., Бадминов П.С., Терешкин С.А., Башкеев А.С., Давыденко Ю.А. Роль электротомографии и электромагнитных зондирований в поисково-оценочных работах для водоснабжения Озерного ГОКа // *Разведка и охрана недр*. 2021. № 12. С. 26–34. EDN: ZFPGZD.

References

1. Shkiria M.S., Lankin Yu.K., Tereshkin S.A., Lazurchenko A.V., Davydenko Yu.A. Applying ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography as part of engineering and geological surveys of a flooded



area in one of the residential areas of Irkutsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(11):160-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3766>. EDN: EKMNKE.

2. Thiagarajan S., Rai S.N., Kumar D., Manglik A. Delineation of groundwater resources using electrical resistivity tomography. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11(9):1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3562-y>.

3. Sanchaa A.M., Fage A.N., Shemelina O.V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;10:90-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105>. EDN: RFYERA.

4. Kumar D., Rao V.A., Sarma V.S. Hydrogeological and geophysical study for deeper groundwater resource in quartzitic hard rock ridge region from 2D resistivity data. *Journal of Earth System Science*. 2014;123(3):531-543. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0408-1>.

5. Belova A.Y., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A., Zaitsev S.V., Olkhovsky I.V., Gulin V.D. Evaluation of the sensitivity of electrical exploration uav systems for solving engineering and geological problems. In: *Inzhenernaya i rudnaya Geofizika 2023: sb. materialov 19-i nauch.-prakt. konf. i vystavki = Engineering and Ore Geophysics 2023: collected materials of the 19th scientific and practical conference and exhibition*. 15–19 May 2023, Saint Petersburg. Saint Petersburg: EAGE Geomodel'; 2023, p. 485-491. (In Russ.). EDN: MZOB0V.

6. Burdenko A.A., Bobachev A.A. Three-dimensional modeling of electric fields from arbitrary shape bodies by the integral equation method. In: *Geoevraziya-2024. Geologorazvedochnye tekhnologii: nauka i biznes: sb. trudov VII Mezhdunar. geol.-geofiz. konf. = GeoEurasia-2024. Geological exploration technologies: science and business: collected works of the 7th International geological and geophysical conference*. 12–14 March 2024, Moscow. Tver: PoliPRESS; 2024, p. 297-300. (In Russ.). EDN: BZIHLY.

7. Bashkeev A.S., Trofimov I.V., Bukhalov S.V., Davydenko Yu.A., Parshin A.V., Prohorov D.A., et al. The sensitivity evaluation of the UAV-TEM technology with two variants of the generator circuit (loop and line) on the example of paleovalley objects. In: *Inzhenernaya i rudnaya Geofizika 2023: sb. materialov 19-i nauch.-prakt. konf. i vystavki = Engineering and Ore Geophysics 2023: collected materials of the 19th scientific and practical conference and exhibition*. 15–19 May 2023, Saint Petersburg. Saint Petersburg: EAGE Geomodel'; 2023, p. 492-500. (In Russ.). EDN: CRXZCF.

8. Tkachuk V.G., Ivanilova R.F., Ivanov I.N. *Hydrogeology of the USSR. V. 19*. Moscow: Nedra; 1968, 496 p. (In Russ.).

9. Shevchenko V.K., Lakhtina O.V., Khazanov V.S., Trush N.I., Boyarskii O.G., Maksimova L.N. *Geocryology of the USSR. Mountain countries of the south of the USSR*. Moscow: Nedra; 1989, 358 p. (In Russ.).

10. Tso C.H.M., Kuras O., Wilkinson P.B., Uhlemann S., Chambers J.E., Meldrum Ph.I., et al. Improved characterisation and modelling of measurement errors in electrical resistivity tomography (ERT) surveys. *Journal of Applied Geophysics*. 2017;146:103-119. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.009>.

11. Riskin M.I. Physical and geological modeling as a basis of geological interpretation of geophysical data complex. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2014;14(1):87-96. (In Russ.). EDN: TBRYRV.

12. Alshehri F., Abdelrahman K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography. *Journal of King Saud University – Science*. 2021;33(5):101468. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101468>.

13. Kulikov V.A., Bobachev A.A., Yakovlev A.G. Applications of electrical resistivity tomography in deep mining prospecting. *Journal Geophysics*. 2014;2:39-46. (In Russ.). EDN: SECXBL.

14. Ducut Ju.D., Alipio M., Go Ph.J., Concepcion II R., Vicerra R.R., Bandala A., et.al. A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection. *Displays*. 2022;73:102208. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102208>.

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

16. Portniaguine O., Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*. 1999;64(3):874-887. <https://doi.org/10.1190/1.1444596>.

17. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963;11(2):431-441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.

18. Olayinka A.I., Yaramanci U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent re-sistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*. 2000;45(2):63-81. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00019-7).

19. Englert A., Kemna A., Zhu J.F., Vanderborght J., Vereecken H., Yeh T.C.J. Comparison of smoothness-constrained and geostatistically based cross-borehole electrical resistivity tomography for characterization of solute tracer plumes. *Water Science and Engineering*. 2016;9(4):274-286. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.01.002>.

20. Baikov E.V., Panin G.L., Manshteyn Yu.A., Manshteyn A.K., Belorodov V.A. Electrotomography – in the geophysics. *Journal Geophysics*. 2012;6:54-63. (In Russ.). EDN: RZDIMJ.

21. Lazurchenko A.V., Shokhonova T.S., Shkiria M.S., Belova A.Yu., Tereshkin S.A. Evaluation of the possibility of searching for groundwater using electrical resistivity tomography based on the data of numerical modelling in complicated permafrost conditions (the case of the territory in the eastern part of the Republic of Buryatia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(7):81-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4348>. EDN: OIUUYI.

22. Shokhonova T.S., Shkiria M.S., Biryukov P.G., Dunyushin A.A., Bashkeev A.S. Engineering geophysical investigations using electrical resistivity tomography for groundwater exploration in the Bodaibo District of the Irkutsk Region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(6):14-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/6/4301>. EDN: ATZVUU.



23. Efremova D.N., Olenchenko V.V., Goreyavcheva A.A. Two-dimensional geoelectric model of the width zonality of permafrost. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018;3:102-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-102-107>. EDN: PIWRJD.

24. Zakharenko V.N., Krakovetskiy Yu.K., Parnachev V.P., Popov L.N. On conductivity of permafrost. *Tomsk State University Journal*. 2012;359:182-187. (In Russ.). EDN: OZOSEJ.

25. Auzinaа L.I., Lankin Yu.K. Features of ground inflow testing in the areas of double porosity aquifer development. *Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):116-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>. EDN: NNSOYJ.

26. Shkiryа M.S., Badminov P.S., Tereshkin S.A., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A. The role of electrotomography and electromagnetic sounding in prospecting and evaluation work for Ozerny Ore Dressing Plant water supply. *Prospect and protection of mineral resources*. 2021;12:26-34. (In Russ.). EDN: ZFPGZD.

Информация об авторах / Information about the authors



Шойхонова Туяна Сергеевна,

младший научный сотрудник департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальных исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ tshoikhonova@geo.istu.edu

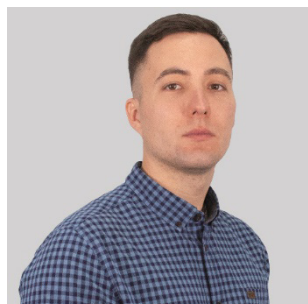
<https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>

Tuyana S. Shoykhonova,

Junior Researcher of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ tshoikhonova@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>



Шкиря Михаил Сергеевич,

независимый исследователь,
г. Новосибирск, Россия,

shkiryа.ms@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>

Mikhail S. Shkiryа,

Independent Researcher,
Novosibirsk, Russia,

shkiryа.ms@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>



Бирюков Павел Геннадьевич,

инженер-исследователь,
институт «Сибирская школа геонаук»,

Иркутский национальных исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

pbiriukov@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

Pavel G. Biryukov,

Research Engineer,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

pbiriukov@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Т.С. Шойхонова – разработка методологии, валидация результатов, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

М.С. Шкиря – разработка концепции, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

П.Г. Бирюков – проведение исследования, формальный анализ.



Tuyana S. Shoykhonova – methodology, validation, writing – original draft, writing – review & editing.
Mikhail S. Shkiryayev – conceptualization, data curation, writing – review & editing.
Pavel G. Biryukov – investigation, formal analysis.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 14.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 10.12.2024.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550

EDN: YBSRRP

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-417-429



Картирование озер и бугров пучения в Арктике с использованием данных синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации с применением технологий глубокого обучения

А.А. Юрьев^a✉, И.А. Шелохов^b, И.В. Буддо^c, А.А. Рыбченко^d

^{a-d}Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

^bНаучный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

^cИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. В ходе проведенного исследования рассматривался процесс разработки и обучения нейронной сети U-Net для сегментации изображений озер и бугров пучения, основанных на данных синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации. Основной целью работы являлось создание эффективной модели глубокого обучения, способной автоматически выделять озера и бугры пучения на основе сложных радиолокационных изображений. Было проведено несколько этапов, включая сбор и аннотирование данных, выбор архитектуры нейронной сети, обучение и валидацию модели, а также оценку ее производительности. Описан процесс создания обучающего набора данных, который включает в себя аннотирование изображений, выделение признаков, а также подготовку данных для обучения. Рассмотрена архитектура U-Net, которая была выбрана из-за своей способности эффективно сегментировать объекты на изображениях. Обоснован выбор гиперпараметров, таких как количество фильтров, размер ядра свертки и функции активации, использован оптимизатор Adam для достижения быстрой и стабильной сходимости модели. Процесс обучения и валидации модели подробно описан с акцентом на использование валидационного подмножества для мониторинга производительности. Применены методы регуляризации, включая раннюю остановку, с целью предотвращения переобучения и улучшения обобщающей способности модели. В результате продемонстрирована значимость применения глубокого обучения для анализа данных синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации, а также подтверждена эффективность модели U-Net для решения задач сегментации.

Ключевые слова: бугры пучения, радиолокация, космодешифрирование, нейронные сети, глубокое обучение, мерзлота, криолитозона, Арктика

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20009, <https://rscf.ru/project/22-17-20009/>. Проект № 22-17-20009 «Современные методы геофизических исследований для разработки и научного обоснования подходов к изучению внутреннего строения криолитозоны и поверхностных криогенных форм рельефа Арктики и их возможной связи с флюидодинамическими процессами» реализуется при поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

Благодарности: За активную поддержку исследований авторы признательны научному сотруднику Научного центра изучения Арктики кандидату геолого-минералогических наук доценту А.С. Смирнову, а также советнику генерального директора Западно-Сибирского научно-исследовательского института геологии и геофизики доктору геолого-минералогических наук А.А. Нежданову. Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Для цитирования: Юрьев А.А., Шелохов И.А., Буддо И.В., Рыбченко А.А. Картирование озер и бугров пучения в Арктике с использованием данных синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации с применением технологий глубокого обучения // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 417–429. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-417-429>. EDN: YBSRRP.



GEOPHYSICS

Original article

Mapping of lakes and heave mounds in the Arctic using synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar data with deep learning technologies

Anton A. Yuriev^{a✉}, Ivan A. Shelokhov^b, Igor V. Buddo^c, Artem A. Rybchenko^d

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

^bArctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper deals with the process of developing and training a U-Net neural network for image segmentation of lakes and hillocks based on synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar data. The main goal of the work is to create an effective deep learning model capable of automatically identifying lakes and heave mounds based on complex radar images. To achieve this goal, several stages were carried out, including data collection and annotation, selection of the neural network architecture, training and validation of the model, as well as evaluation of its performance. At the beginning of the work, the process of creating a training dataset is described, which includes annotating images, highlighting features, and preparing data for training. Next, we consider the U-Net architecture, which was chosen because of its ability to efficiently segment objects in images. The choice of hyperparameters, such as the number of filters, the size of the convolution core and activation functions, is justified, and the Adam optimizer is used to achieve fast and stable convergence of the model. The learning and validation process of the model is described in detail with an emphasis on using the validation subset to monitor performance. Regularization methods, including early stopping, are used to prevent overfitting and improve the generalizing ability of the model. As a result, the importance of using deep learning for synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar data analysis is demonstrated, as well as confirmation of the effectiveness of the U-Net model for solving segmentation problems.

Keywords: frost mounds, synthetic aperture radar, satellite image decoding, neural networks, deep learning, permafrost, cryolithozone, Arctic

Funding: The study was funded by grant 22-17-20009 from the Russian Science Foundation (<https://rscf.ru/project/22-17-20009/>). The study, 22-17-20009, was supported by the government of the Yamal-Nenets Autonomous District.

Acknowledgements: For active support of the research, the authors are grateful to the research fellow of the Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor A.S. Smirnov, as well as to the Advisor to the General Director of the West Siberian Scientific Research Institute of Geology and Geophysics, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.) A.A. Nezhdanov. The research was carried out within the topic No. 1023110300018-4-1.5.4 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Laboratory for Integrated Research of the Arctic of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk).

For citation: Yuriev A.A., Shelokhov I.A., Buddo I.V., Rybchenko A.A. Mapping of lakes and heave mounds in the Arctic using synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar data with deep learning technologies. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):417-429. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-417-429>. EDN: YBSRRP.

Введение

Актуальность анализа радиолокационных изображений обусловлена необходимостью точного мониторинга изменений в природных экосистемах, что имеет важное значение для экологических исследований, управления водными ресурсами и оценки воздействия климатических изменений в Арктике¹ [1–9]. В данной работе рассматривается процесс разработки и обучения нейронной сети U-Net для сегментации изображений озер и бугров пучения, основанных на данных синтетической

апертурной радиолокации (SAR, *от англ.*: Synthetic Aperture Radar) и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации (InSAR, *от англ.*: Interferometric Synthetic Aperture Radar) [9–18].

Основной целью проведенного исследования являлась разработка эффективного метода картирования озер и бугров пучения в регионе Арктики с использованием данных SAR, InSAR и технологий глубокого обучения. Исследование направлено на создание высокоточных карт, которые позволят лучше

¹ Пленарное заседание Международного арктического форума // Kremlin.ru. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/60250> (дата обращения: 11.03.2024).



понять распределение и динамику этих объектов.

К задачам исследования можно отнести:

– сбор и обработку данных, необходимых для анализа и картирования озер и бугров пучения;

– выделение признаков, позволяющих различить озера и бугры пучения на основе спутниковых данных;

– разработку модели глубокого обучения, подходящей для картирования озер и бугров пучения.

Материалы и методы исследования

Для картирования озер и бугров пучения использовались данные SAR и InSAR, полученные с различных спутников, обеспечивающих высокое качество и разрешение снимков. В табл. 1 приведено описание используемых данных, их источников, спутников и временных рамок.

Сочетание данных SAR и InSAR с методами глубокого обучения создает мощный инструмент для картирования и мониторинга озер и бугров пучения, что имеет большое значение для экологии, геологии и управления природными ресурсами. Применение данных различных спутников в сочетании с современными методами глубокого обучения открывает новые возможности для более точного анализа и мониторинга этих природных объектов [9–17]. В качестве ключевых преимуществ данного подхода можно отметить следующие:

- высокое пространственное разрешение;
- независимость от погодных условий;
- способность к детектированию изменений;
- эффективная обработка больших объемов данных;

- автоматизация процесса картирования;
- улучшенная точность классификации;
- интеграция с другими данными;
- применение в реальном времени.

Преимущества и недостатки методов SAR и InSAR приведены в табл. 2.

В ходе проведенного исследования для обработки данных SAR и InSAR использовались два основных программных продукта: ArcGIS 10.8 и SNAP (Sentinel Application Platform). Эти инструменты обеспечивают мощные возможности для анализа, визуализации и интерпретации спутниковых данных.

В процессе работы с данными SAR и InSAR в ArcGIS 10.8 проводилась предварительная обработка, включающая коррекцию геометрии, фильтрацию шумов и создание картографических представлений для дальнейшего анализа.

В рамках исследования SNAP использовался для обработки и анализа данных InSAR, включая создание интерферограмм, выравнивание изображений и вычисление изменений высоты. Это дало возможность получить точные данные о деформациях и динамике бугров пучения.

Использование ArcGIS 10.8 и SNAP позволило эффективно обрабатывать и анализировать данные SAR и InSAR. Эти программные инструменты обеспечили необходимые функции для выполнения комплексного анализа, визуализации результатов и получения надежных карт озер и бугров пучения, что является важным вкладом в изучение и мониторинг данных объектов.

В процессе работы были использованы конволюционные (сверточные) нейронные сети (CNN), углубленные сети с пропускными соединениями (ResNet), сети U-Net, а также модели глубокого обучения для временного анализа.

Таблица 1. Описание используемых данных синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации

Table 1. Description of used synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar data

Параметр	SAR	InSAR
Источники данных	Радиолокационные системы, которые позволяют получать изображения поверхности Земли с высоким пространственным разрешением и в любых погодных условиях	Интерферометрическая обработка последовательных SAR-снимков
Спутник	Sentinel-1 Radarsat-2	Sentinel-1 ALOS-2
Временные рамки	Летний период 2016–2024 гг.	Летний период 2016–2024 гг.



Таблица 2. Преимущества и недостатки синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации

Table 2. Advantages and disadvantages of synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar

SAR		InSAR	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
Независимость от погодных условий: SAR работает в микроволновом диапазоне, что позволяет получать изображения независимо от облачности, дождя или других атмосферных условий, которые могут ограничивать использование оптических систем	Сложность интерпретации данных: изображения SAR могут быть сложными для интерпретации из-за наличия шумов и артефактов, что требует специальных знаний и навыков	Высокая точность измерений: InSAR позволяет измерять деформации поверхности с микрометровой точностью, что полезно для мониторинга землетрясений, осадков и других геодинамических процессов	Сложность обработки данных: обработка интерферограмм требует значительных вычислительных ресурсов и сложных алгоритмов, что может быть трудоемким процессом
Высокая разрешающая способность: SAR может обеспечивать высокую пространственную разрешающую способность, что позволяет детально исследовать различные объекты и их характеристики	Влияние геометрии и поверхности: результаты обработки SAR могут зависеть от геометрии местности и типа поверхности, что может привести к ошибкам в интерпретации	Картирование изменений: технология позволяет получать карты изменений высоты поверхности, что имеет важное значение для анализа природных катастроф и изменений в экосистемах	Зависимость от временных интервалов: для получения точных результатов требуется наличие временных интервалов между снимками, что может ограничивать возможности мониторинга динамических процессов
Способность работать в ночное время: в отличие от оптической съемки, SAR может осуществлять наблюдения в любое время суток, что делает его особенно полезным для мониторинга динамических процессов	Ограниченная информация о цвете: SAR не предоставляет информации о цвете объектов, что может быть важным для некоторых приложений	Обширное покрытие: InSAR может охватывать большие площади, что делает его эффективным инструментом для мониторинга регионов и территорий	Проблемы с многозначностью: в некоторых ситуациях интерферометрию может быть сложно интерпретировать из-за многозначности, особенно в сложных ландшафтах
Информация о высоте и структуре: SAR предоставляет возможность получать данные о высоте объектов и их трехмерной структуре, что полезно для анализа сложных ландшафтов	—	—	—

С помощью CNN проводились классификация и сегментация изображений, полученных из данных SAR и InSAR. Архитектура CNN включала несколько последовательных слоев свертки, активации и подвыборки, которые позволяли выявлять низкоуровневые и высокоуровневые признаки, характерные для озер и бугров пучения. Для повышения точно-

сти классификации использовались такие модификации CNN, как VGG, ResNet и Inception (каждая из них имеет свои преимущества в обработке спутниковых изображений).

ResNet применялась для улучшения качества классификации и сегментации объектов на изображениях, полученных из данных SAR и InSAR. Сети U-Net использовались для



сегментации изображений, полученных из данных SAR и InSAR, с целью точного выделения границ озер и бугров пучения. Модели глубокого обучения применялись для анализа временных изменений в высоте поверхности и динамике озер и бугров пучения, полученных из данных InSAR (табл. 3).

Комбинируя эти методики глубокого обучения, исследователи смогли достичь высокой точности и эффективности в картировании озер и бугров пучения на основе данных SAR и InSAR. Применение различных архитектур позволило извлекать ключевые пространственные и временные признаки, что способствовало улучшению качества классификации и сегментации объектов.

Для успешного применения методов глубокого обучения в исследовании озер и бугров пучения на основе данных дистанционного зондирования Земли необходимо выполнить ряд подготовительных этапов. В первую очередь требуется провести предварительную обработку данных SAR и InSAR для повышения их качества и точности. Далее идет создание обучающего набора данных с выделением необходимых признаков. После этого важно правильно выбрать архитектуру модели глубокого обучения и обосновать ее применение. Затем следует описание процессов обучения модели и ее валидации. Для более детального анализа полученных результатов необходимо провести ранжирование выявленных полигонов озер по степени их округлости. Наконец

следует оценить влияние разрешения данных и качества моделей на достоверность результатов.

1. Предварительная обработка данных.

Обработка данных SAR и InSAR требует применения различных методов фильтрации и коррекции для улучшения качества изображений и повышения точности анализа.

Коррекция данных SAR необходима для устранения геометрических и радиометрических искажений, которые могут возникнуть в процессе съемки. Это обеспечивает точное соответствие между полученными изображениями и реальными координатами объектов на Земле.

Данные InSAR требуют дополнительных шагов обработки, связанных с интерференцией и вычислением изменений высоты.

Процессы фильтрации и коррекции данных SAR и InSAR являются критически важными для повышения точности и надежности анализа. Применение различных методов фильтрации и коррекции позволяет минимизировать влияние шумов и искажений, что способствует более точному картированию и мониторингу озер и бугров пучения. Эти этапы обработки являются основой для успешного применения методов глубокого обучения и других аналитических инструментов в исследовании.

Подготовка данных для анализа в ArcGIS и SNAP является критически важным этапом, который включает в себя сбор, обработку и

Таблица 3. Преимущества и недостатки моделей глубокого обучения
Table 3. Advantages and disadvantages of deep learning models

Преимущества	Недостатки
Автоматизация анализа данных: глубокое обучение позволяет автоматизировать процесс анализа больших объемов данных, что значительно ускоряет обработку и интерпретацию информации	Необходимость больших объемов данных: для достижения высокой производительности модели глубокого обучения требуется большое количество аннотированных данных, что может быть трудоемким и дорогостоящим процессом
Высокая точность: современные модели глубокого обучения (например, U-Net) демонстрируют высокую точность в задачах сегментации и классификации, что делает их полезными для анализа изображений SAR и InSAR	Проблемы с интерпретируемостью: модели глубокого обучения могут являться так называемыми черными ящиками, и интерпретация их решений может быть сложной, что затрудняет понимание причин ошибок
Способность к обобщению: модели глубокого обучения могут эффективно обобщать информацию и выявлять сложные паттерны, что позволяет получать более точные предсказания в условиях неопределенности	Зависимость от гиперпараметров: производительность модели может сильно зависеть от выбора гиперпараметров, что требует тщательной настройки и валидации
Гибкость и адаптивность: глубокие нейронные сети можно настраивать и адаптировать под различные задачи и типы данных, что делает их универсальными инструментами в области анализа данных	—



анализ данных SAR и InSAR. Правильная подготовка данных гарантирует высокую точность результатов и их надежность в контексте исследования. Комбинирование возможностей двух программных комплексов позволяет добиться более полного и глубокого анализа природных объектов.

2. Создание обучающего набора данных: выделение признаков для озер и бугров пучения.

Создание обучающего набора данных – это важный процесс, в ходе которого извлекаются и формируются признаки, необходимые для обучения моделей глубокого обучения. В контексте анализа озер и бугров пучения на основе данных SAR и InSAR выделение признаков включает несколько ключевых этапов: сбор исходных данных, непосредственно выделение признаков, создание обучающего набора данных, подготовка данных для обучения.

Создание обучающего набора данных и выделение признаков для озер и бугров пучения – это многоэтапный процесс, требующий внимания к деталям и тщательной обработки данных. Корректное выделение спектральных, пространственных и временных признаков, а также создание аннотированного обучающего набора обеспечивают основу для успешного обучения моделей глубокого обучения. Это, в свою очередь, способствует достижению высокой точности классификации и сегментации объектов на изображениях SAR и InSAR, что имеет важное значение для изучения динамики природных экосистем.

3. Архитектура модели глубокого обучения.

В данном исследовании была выбрана архитектура нейронной сети U-Net для решения задач сегментации изображений озер и бугров пучения на основе данных SAR и InSAR. U-Net является одной из наиболее популярных архитектур для задач сегментации, особенно в области медицинской визуализации, но также успешно применяется и в других областях, связанных с анализом изображений [19–21].

Архитектура U-Net является мощным инструментом для решения задач сегментации изображений, ее применение в данном исследовании позволяет достичь высокой точ-

ности в выделении озер и бугров пучения из данных SAR и InSAR. Преимущества данной архитектуры, такие как сохранение пространственной информации и эффективность работы с малыми наборами данных, делают ее идеальным выбором для решения поставленных задач.

4. Обоснование выбора архитектуры и гиперпараметров U-Net.

Выбор архитектуры U-Net и гиперпараметров был тщательно обоснован с учетом специфики задачи сегментации, требования к точности и доступности данных. U-Net, благодаря своей архитектуре и особенностям, обеспечивает высокую эффективность в выделении объектов на изображениях SAR и InSAR, что критически важно для анализа озер и бугров пучения. Настройка гиперпараметров позволяет оптимизировать обучение модели и достичь качественных результатов, что делает этот подход подходящим для решения поставленных задач.

5. Описание процесса обучения модели и валидации.

Обучение модели и валидация – это сложный и многоэтапный процесс, который требует тщательной подготовки данных, настройки гиперпараметров и мониторинга производительности.

Настройка и обучение модели включает в себя четыре основных этапа, успешное выполнение которых позволяет создать устойчивую и точную модель для сегментации изображений, что критически важно для анализа данных SAR и InSAR:

- подготовку данных для обучения;
- обучение модели;
- валидацию модели;
- тестирование модели.

Правильная настройка и оценка модели помогают достигать высоких результатов и обеспечивают надежность выводов, сделанных на основе проведенного анализа.

6. Ранжирование получаемых полигонов озер по степени округлости.

Коэффициент округлости R_c является важным показателем, который позволяет оценить форму водоемов и их отклонение от идеальной круглой формы². Для вычисления данного коэффициента используется следующая формула:

² Miller V.C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Project NR 389-402: technical report 3. New York: Columbia University, Department of Geology, 1953. 51 p.



$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2},$$

где A – площадь бассейна; P – периметр бассейна.

Коэффициент округлости определяется как отношение площади бассейна к площади круга, имеющего тот же периметр, что и бассейн. При значении, близком к 1, форма бассейна сходна с кругом.

Для реализации подхода было написано специальное программное решение (скрипт) на базе программы ArcGIS. После выполнения скрипта можно использовать инструменты ArcGIS для ранжирования полигонов по значению коэффициента округлости. Это можно сделать с помощью анализа атрибутов или визуализации на карте, что позволит легко идентифицировать более округлые и вытянутые формы озер.

Создание скрипта для вычисления коэффициента округлости в ArcGIS позволяет автоматизировать процесс анализа форм полигонов озер. Использование этого коэффициента помогает в экологических исследованиях и управлении водными ресурсами, так как предоставляет полезную информацию о геометрии водоемов. Подобный подход может быть адаптирован и для других параметров, связанных с формой объектов, что расширяет возможности анализа в географических информационных системах.

7. Влияние разрешения данных и качества моделей на результаты.

Разрешение данных и качество моделей являются ключевыми факторами, определяющими точность и достоверность результатов в задачах анализа и интерпретации изображений, особенно в контексте применения SAR, InSAR и методов глубокого обучения.

Высокое пространственное разрешение позволяет детально выявлять мелкие объекты и структуры на изображениях. Например, в задачах сегментации озер и бугров пучения высокое разрешение способствует точному определению границ объектов, что критически важно для экологических исследований и мониторинга. Низкое пространственное разрешение может привести к потере информации и нечеткой сегментации, что затрудняет анализ и интерпретацию данных. Объекты могут сливаться или терять детали, что может привести к ошибкам в классификации.

В таких задачах мониторинга изменений, как отслеживание деформаций или изменений в экосистемах, высокое временное разрешение обеспечивает более частые снимки и позволяет выявлять динамику процессов. Это особенно важно для InSAR, где регулярные наблюдения помогают отслеживать изменения высоты поверхности. Низкое временное разрешение может привести к упущению важных событий или изменений, снизив общую эффективность мониторинга.

Качество моделей, используемых для анализа данных, непосредственно влияет на точность и надежность результатов. Выбор архитектуры нейронной сети U-Net может существенно повлиять на результаты сегментации. Архитектуры, специально разработанные для задач обработки изображений, обычно лучше справляются с выявлением сложных паттернов и форм. Неподходящая архитектура может привести к низкой точности и затруднениям в извлечении значимой информации из данных.

Качество обучения модели, которое включает в себя выбор гиперпараметров, метод предобработки данных и использование методов регуляризации, напрямую влияет на ее производительность. Правильная настройка гиперпараметров может значительно улучшить точность модели и ее способность обобщать. Переобучение модели на обучающих данных может привести к плохим результатам на валидационных и тестовых наборах, что подчеркивает важность регуляризации и кросс-валидации.

Наличие аннотированных данных высокого качества критично для успешного обучения моделей глубокого обучения. Ошибки и несоответствия в аннотациях могут приводить к неправильному обучению и низкой точности предсказаний.

Разрешение данных и качество моделей являются взаимосвязанными факторами, которые в совокупности определяют успешность анализа. Даже самая продвинутая модель не сможет показать высокие результаты на данных низкого разрешения, а высококачественные данные без надлежащей модели могут привести к недостаточной интерпретации.

Влияние разрешения данных и качества моделей на результаты анализа является критически важным аспектом в области исследования и мониторинга природных и антропогенных процессов. Высокое пространственное и временное разрешение данных в сочетании с качественными моделями глубокого обучения



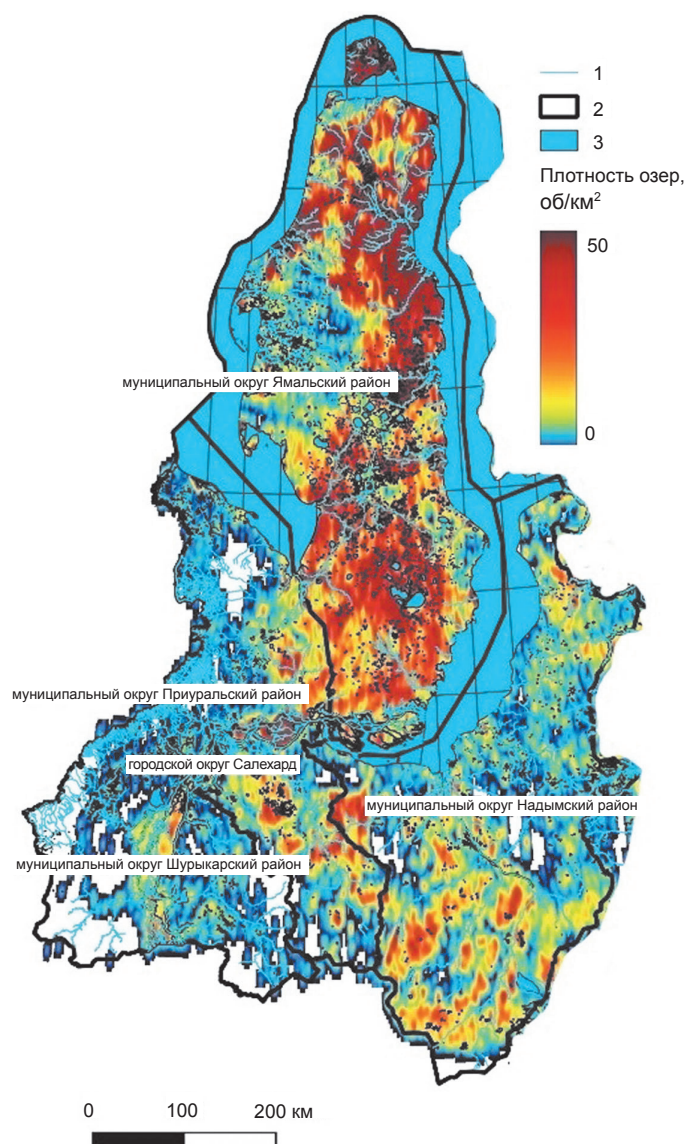
обеспечивает точность и надежность результатов, что, в свою очередь, способствует более эффективному управлению ресурсами и охране окружающей среды. Понимание этих аспектов позволяет оптимизировать подходы к анализу данных и улучшать результаты в различных приложениях.

Результаты исследования и их обсуждение

Основная цель дешифрирования данных SAR и inSAR заключалась в выявлении рай-

онов повышенной пространственной плотности размещения озер и бугров пучения на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. В соответствии с результатами исследований, описанных в работах³ [22–25], некоторые бугры пучения могут иметь эндогенное происхождение и являться индикатором активных глубинных флюидодинамических процессов.

По результатам дешифрирования данных SAR и inSAR построены карты плотности озер (рис. 1) и бугров пучения (рис. 2).



**Рис. 1. Карта плотности озер, выделенных при дешифровке
синтетической апертурной радиолокации:**

1 – гидросеть; 2 – административные границы; 3 – водоемы

Fig. 1. Density map of lakes identified during synthetic aperture radar decryption:

1 – hydro grid; 2 – administrative borders; 3 – reservoirs

³ Нежданов А.А., Смирнов А.С. Флюидодинамическая интерпретация сейсморазведочных данных: учеб. пособие. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2021. 286 с. EDN: CHWAYW.

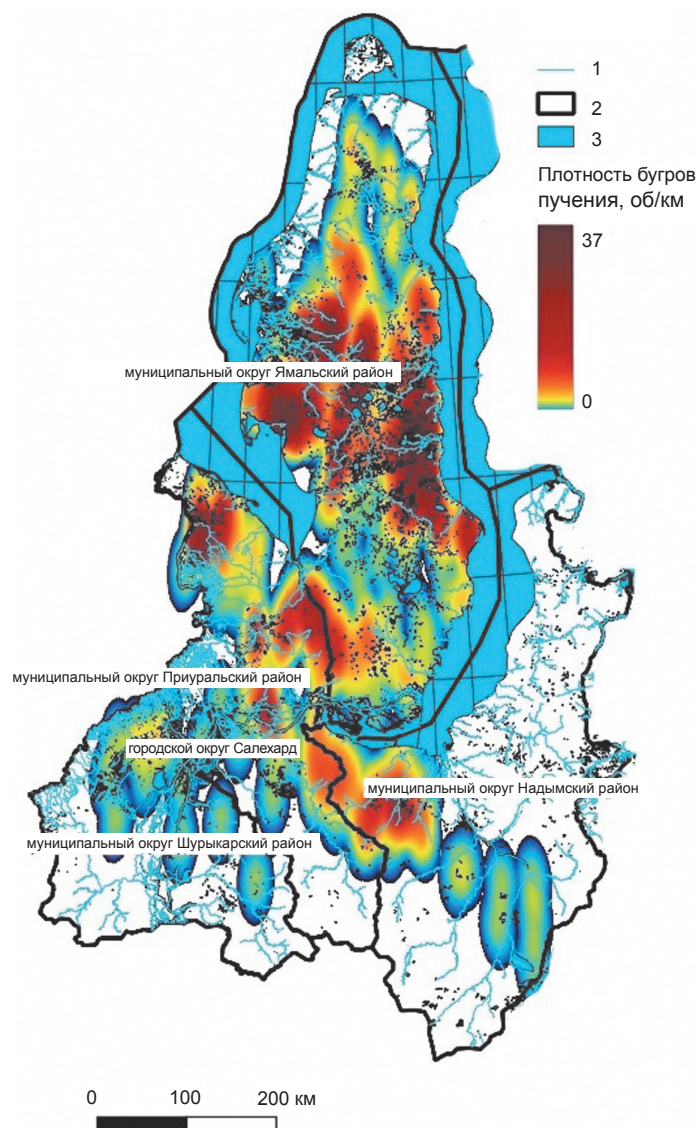


Рис. 2. Карта плотности бугров пучения, выделенных при дешифровке синтетической апертурной радиолокации и интерферометрической синтетической апертурной радиолокации:

1 – гидросеть; 2 – административные границы; 3 – водоемы

Fig. 2. Density map of the heaving mounds identified during synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar decryption:

1 – hydro grid; 2 – administrative borders; 3 – reservoirs

Как видно из рис. 1, наибольшая плотность озер характерна для южной и восточной частей полуострова Ямал, а также для Надымского района. Наибольшее же количество бугров пучения сосредоточено в центральной части Ямала и на его восточном побережье, а также в северной части Надымского района. Действительно, именно в пределах выявленных районов глубинные флюидодинамические процессы наиболее явно проявлены, в том числе образованием известного Ямальского кратера [26].

В дальнейшем целесообразно продолжить данное исследование в направлении оценки

динамики роста бугров пучения на основе анализа данных SAR и InSAR, полученных в разные моменты времени, то есть на основе мониторинговых наблюдений.

Закключение

Проведенное исследование подчеркивает значимость применения современных технологий глубокого обучения в сочетании с данными SAR и InSAR для решения задач сегментации и мониторинга природных объектов. Повышение качества данных и моделей, а также использование комплексного подхода к анализу открывают новые горизонты для дальнейших



исследований в области экологии, географии и управления природными ресурсами.

Практическое применение полученных результатов (следование рекомендациям обеспечит их большую точность и надежность) может значительно улучшить процессы мониторинга и анализа природных объектов.

Направления для будущих исследований и улучшения методов открывают новые го-

ризонты применению технологий глубокого обучения и дистанционного зондирования в анализе природных экосистем. Усовершенствование моделей, методов предобработки и интеграции различных подходов позволяет достигать более точных и надежных результатов, что способствует эффективному управлению природными ресурсами и охране окружающей среды.

Список источников

1. Жилина И.Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. 2021. № 1. С. 66–87. <https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.04>. EDN: GSPTRV.
2. Гудков А.Б., Попова О.Н., Небученных А.А., Богданов М.Ю. Эколого-физиологическая характеристика климатических факторов Арктики. Обзор литературы // Морская медицина. 2017. Т. 3. № 1. С. 7–13. <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2017-3-1-7-13>. EDN: YHDEON.
3. Воронина С.А., Порфирьев Б.Н., Семикашев В.В., Терентьев Н.Е., Елисеев Д.О., Наумова Ю.В. Последствия изменений климата для экономического роста и развития отдельных секторов экономики российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4. С. 4–17. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-4-4-17>. EDN: YMRLRQ.
4. Куделькин Н.С. Арктика и глобальное потепление: адаптация к изменению климата и охрана окружающей среды // Юридические исследования. 2022. № 1. С. 1–16. <https://doi.org/10.25136/2409-7136.2022.1.37049>. EDN: KNUXCH.
5. Эдельгериев Р.С.Х., Романовская А.А. Новые подходы к адаптации к изменениям климата на примере Арктической зоны Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 12–28. EDN: TRDOGS.
6. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В. [и др.]. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геофизиологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)). EDN: HROYGC.
7. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 32–39. EDN: KYRZGR.
8. Агарков С.А., Козьменко С.Ю., Щеголькова А.А. Эпоха глобального потепления: перспективы экономического взаимодействия в «Новой Арктике» // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2019. № 1. С. 26–36. <https://doi.org/10.25702/KSC.2220-802X.1.2019.63.26-36>. EDN: ZQNNOP.
9. Chuang K.-S., Tzeng H.-L., Chen S., Wu J., Chen T.-J. Fuzzy c-means clustering with spatial information for image segmentation // Computerized Medical Imaging and Graphics. 2006. Vol. 30. Iss. 1. P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2005.10.001>.
10. Anantrasirichai N., Biggs J., Kelevitz K., Sadeghi Z., Wright T., Thompson J., et al. Detecting ground deformation in the built environment using sparse satellite InSAR data with a convolutional neural network // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021. Vol. 59. Iss. 4. P. 2940–2950. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3018315>.
11. Mavrovic A., Sonnentag O., Lemmetyinen J., Baltzer J.L., Kinnard C., Roy A. Reviews and syntheses: recent advances in microwave remote sensing in support of terrestrial carbon cycle science in Arctic-boreal regions // Biogeosciences. 2023. Vol. 20. Iss. 14. P. 2941–2970. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2941-2023>.
12. Merchant M., Bourgeau-Chavez L., Mahdianpari M., Brisco B., Obadia M., Devries B., et al. Arctic ice-wedge landscape mapping by CNN using a fusion of Radarsat constellation Mission and ArcticDEM // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 304. P. 114052. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114052>.
13. Li X., Zhang K., Niu J., Liu L. A machine learning-based dynamic ensemble selection algorithm for microwave retrieval of surface soil freeze/thaw: a case study across China // GIScience & Remote Sensing. 2022. Vol. 59. Iss. 1. P. 1550–1569. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2122117>.
14. Pan J., Zhao R., Xu Z., Cai Z., Yuan Y. Quantitative estimation of sentinel-1A interferometric decorrelation using vegetation index // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. P. 1016491. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1016491>.
15. Byers M., Covey N. Arctic SAR and the “security dilemma” // International Journal. 2019. Vol. 74. Iss. 4. P. 499517. <https://doi.org/10.1177/0020702019890339>.
16. Sydnese A.K., Sydnese M., Antonsen Y. International cooperation on search and rescue in the Arctic // Arctic Review on Law and Politics. 2017. Vol. 8. P. 109–136. <https://doi.org/10.23865/arctic.v8.705>.
17. Morris K., Jeffries M.O., Weeks W.F. Ice processes and growth history on Arctic and sub-Arctic lakes using ERS-1 SAR data // Polar Record. 1995. Vol. 31. Iss. 177. P. 115–128. <https://doi.org/10.1017/S0032247400013619>.
18. Liu X., Zhang Y., Jing H., Wang L., Zhao S. Ore image segmentation method using U-Net and Res_Unet convolutional networks // RSC Advances. 2020. Vol. 10. Iss. 16. P. 9396–9406. <https://doi.org/10.1039/C9RA05877J>.
19. Norouzi A., Rahim M.S.M., Altameem A., Saba T., Rad A.E., Rehman A., et al. Medical image segmentation methods, algorithms, and applications // IETE Technical Review. 2014. Vol. 31. Iss. 3. P. 199–213. <https://doi.org/10.1080/02564602.2014.906861>.
20. Печкин А.Д., Кириллова Т.К. Оценка и перспективы развития глубокого обучения искусственных нейронных сетей // Молодая наука Сибири. 2021. № 1. С. 375–380. EDN: SDQIAU.



21. Грицков И.О., Говоров А.В., Васильев А.О., Ходырева Л.А., Ширяев А.А., Пушкарь Д.Ю. Data Science – глубокое обучение нейросетей и их применение в здравоохранении // Здоровье мегаполиса. 2021. Т. 2. № 2. С. 109–115. <https://doi.org/10.47619/2713-2617.zm.2021.v2i2;109-115>. EDN: SGWBPD.
22. Buddo I.V., Sharlov M., Shelokhov I., Misyurkeeva, N., Seminsky I., Selyaev V., et al. Applicability of transient electromagnetic surveys to permafrost imaging in Arctic West Siberia // *Energies* 2022. Vol. 15. Iss. 5. P. 1816. <https://doi.org/10.3390/en15051816>.
23. Buddo I., Misyurkeeva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., et al. Modeling of explosive Pingo-like structures and fluid-dynamic processes in the Arctic permafrost: workflow based on integrated geophysical, geocryological, and analytical data // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 16. P. 2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.
24. Misyurkeeva N., Buddo I., Kraev G., Smirnov A., Nezhdanov A., Shelokhov I., et al. Periglacial landforms and fluid dynamics in the permafrost domain: a case from the Taz Peninsula, West Siberia // *Energies*. 2022. 15. Iss. 8. P. 2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.
25. Misyurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Y. The structure of permafrost in northern West Siberia: geophysical evidence // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 8. P. 2847. <https://doi.org/10.3390/en15082847>.
26. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvin E., Bukhanov B., et al. New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: results of the expedition and data processing // *Geosciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 2. P. 71. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.

References

1. Zhilina I.Yu. Warming in the arctic: opportunities and risks. *Economic and Social Problems of Russia*. 2021;1:66-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.04>. EDN: GSPTRV.
2. Gudkov A.B., Popova O.N., Nebuchennyh A.A., Bogdanov M.Yu. Ecological and physiological characteristic of the Arctic climatic factors. Review. *Marine Medicine*. 2017;3(1):7-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2017-3-1-7-13>. EDN: YHDEOH.
3. Voronina S.A., Porfiriev B.N., Semikashev V.V., Terentiev N.E., Eliseev D.O., Naumova Yu.V. Climate change impact on economic growth and specific sectors' development of the Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2017;4:4-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-4-4-17>. EDN: YMRLRQ.
4. Kudelkin N. The Arctic and global warming: adaptation to climate change and environmental protection. *Legal Studies*. 2022;1:1-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.25136/2409-7136.2022.1.37049>. EDN: KNUXCH.
5. Edel'geriev R.S.K., Romanovskaya A.A. New approaches to the adaptation to climate change: the Arctic zone of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020;5:12-28. (In Russ.). EDN: TRDOGS.
6. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., et al. Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*. 2020;24(2):15-30. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)). EDN: HROYGC.
7. Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian north. *Earth's Cryosphere*. 2009;13(4):32-39. (In Russ.). EDN: KYRZGR.
8. Agarkov S.A., Koz'menko S.Yu., Shchegol'kova A.A. The era of global warming: prospects of economic interaction in the "New Arctic". *North and market: formation of economic order*. 2019;1:26-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2220-802X.1.2019.63.26-36>. EDN: ZQNNOP.
9. Chuang K.-S., Tzeng H.-L., Chen S., Wu J., Chen T.-J. Fuzzy c-means clustering with spatial information for image segmentation. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2006;30(1):9-15. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2005.10.001>.
10. Anantrasirichai N., Biggs J., Kelevitz K., Sadeghi Z., Wright T., Thompson J., et al. Detecting ground deformation in the built environment using sparse satellite InSAR data with a convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021;59(4):2940-2950. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3018315>.
11. Mavrovic A., Sonnentag O., Lemmetyinen J., Baltzer J.L., Kinnard C., Roy A. Reviews and syntheses: recent advances in microwave remote sensing in support of terrestrial carbon cycle science in Arctic-boreal regions. *Biogeosciences*. 2023;20(14):2941-2970. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2941-2023>.
12. Merchant M., Bourgeau-Chavez L., Mahdianpari M., Brisco B., Obadia M., Devries B., et al. Arctic ice-wedge landscape mapping by CNN using a fusion of Radarsat constellation Mission and ArcticDEM. *Remote Sensing of Environment*. 2024;304:114052. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114052>.
13. Li X., Zhang K., Niu J., Liu L. A machine learning-based dynamic ensemble selection algorithm for microwave retrieval of surface soil freeze/thaw: a case study across China. *GIScience & Remote Sensing*. 2022;59(1):1550-1569. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2122117>.
14. Pan J., Zhao R., Xu Z., Cai Z., Yuan Y. Quantitative estimation of sentinel-1A interferometric decorrelation using vegetation index. *Frontiers in Earth Science*. 2022;10:1016491. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1016491>.
15. Byers M., Covey N. Arctic SAR and the "security dilemma". *International Journal*. 2019;74(4):499-517. <https://doi.org/10.1177/0020702019890339>.
16. Sydnes A.K., Sydnes M., Antonsen Y. International cooperation on search and rescue in the Arctic. *Arctic Review on Law and Politics*. 2017;8:109-136. <https://doi.org/10.23865/arctic.v8.705>.
17. Morris K., Jeffries M.O., Weeks W.F. Ice processes and growth history on Arctic and sub-Arctic lakes using ERS-1 SAR data. *Polar Record*. 1995;31(177):115-128. <https://doi.org/10.1017/S0032247400013619>.



18. Liu X., Zhang Y., Jing H., Wang L., Zhao S. Ore image segmentation method using U-Net and Res_Unet convolutional networks. *RSC Advances*. 2020;10(16):9396-9406. <https://doi.org/10.1039/C9RA05877J>.
19. Norouzi A., Rahim M.S.M., Altameem A., Saba T., Rad A.E., Rehman A., et al. Medical image segmentation methods, algorithms, and applications. *IETE Technical Review*. 2014;31(3):199-213. <https://doi.org/10.1080/02564602.2014.906861>.
20. Pechkin A.D., Kirillova T.K. Assessment and prospects for the development of artificial neural network deep learning. *Young science of Siberia*. 2021;1:375-380. (In Russ.). EDN: SDQIAU.
21. Gritskov I.O., Govorov A.V., Vasiliev A.O., Khodyreva L.A., Shiryaev A.A., Pushkar D.Yu. Data science – deep learning of neural networks and their application in healthcare. *City Healthcare*. 2021;2(2):109-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.47619/2713-2617.zm.2021.v2i2;109-115>. EDN: SGWBPD.
22. Buddo I.V., Sharlov M., Shelokhov I., Misyurkeeva N., Seminsky I., Selyaev V., et al. Applicability of transient electromagnetic surveys to permafrost imaging in Arctic West Siberia. *Energies*. 2022;15(5):1816. <https://doi.org/10.3390/en15051816>.
23. Buddo I., Misyurkeeva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., et al. Modeling of explosive Pingo-like structures and fluid-dynamic processes in the Arctic permafrost: workflow based on integrated geophysical, geocryological, and analytical data. *Remote Sensing*. 2024;16(16):2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.
24. Misyurkeeva N., Buddo I., Kraev G., Smirnov A., Nezhdanov A., Shelokhov I., et al. Periglacial landforms and fluid dynamics in the permafrost domain: a case from the Taz Peninsula, West Siberia. *Energies*. 2022;15(8):2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.
25. Misyurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Y. The structure of permafrost in northern West Siberia: geophysical evidence. *Energies*. 2022;15(8):2847. <https://doi.org/10.3390/en15082847>.
26. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., et al. New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: results of the expedition and data processing. *Geosciences*. 2021;11(2):71. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.

Информация об авторах / Information about the authors



Юрьев Антон Александрович,

аспирант,
ведущий инженер лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
лаборатории комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ antonyrevgeo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2452-4840>

Anton A. Yuriev,

Postgraduate Student,
Lead Engineer of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ antonyrevgeo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2452-4840>



Шелухов Иван Антонович,

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики,
лаборатории комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ведущий научный сотрудник,
Научный центр изучения Арктики,
г. Салехард, Россия,
sia@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>

Ivan A. Shelokhov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Leading Researcher,
Scientific Center for the Study of the Arctic,
Salekhard, Russia,
sia@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией комплексной геофизики,
лабораторией комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
biv@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>

Igor V. Buddo,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
biv@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>



Рыбченко Артем Александрович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
rybchenk@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>

Artem A. Rybchenko,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
rybchenk@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.А. Юрьев – разработка концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи.

И.А. Шелохов – визуализация, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

И.В. Буддо – разработка концепции, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А.А. Рыбченко – написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Anton A. Yuriev – conceptualization, methodology, writing – original draft.

Ivan A. Shelokhov – visualization, writing – review & editing.

Igor V. Buddo – conceptualization, writing – original draft, writing – review & editing.

Artem A. Rybchenko – writing – review & editing.

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 15.11.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 11.12.2024.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 28.11.2024; accepted for publication 11.12.2024.

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

Научная статья

УДК 551.37

EDN: TTLTBO

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-430-441

Результаты 3D сейсморазведочных работ при поисках
углеводородов в Гвинейском заливеД.Л.А. Онамун^{a,б} А.Г. Дмитриев^б^{a,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Сейсмические методы являются одними из важнейших при проведении поисков, разведки, оценки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Работа включает в себя три этапа: сбор сейсмических данных, их обработку и интерпретацию. Сейсморазведка может проводиться в 2D, 3D или 4D-модификациях. Исследование было сосредоточено на морской 3D-сейсморазведке на глубоком шельфе северной части Гвинейского залива в осадочном бассейне Тано в Кот-д'Ивуаре. Целью работы являлись оценка коммерческих перспектив обнаружения месторождений углеводородов на лицензионном участке RUS-CIV, определение возможностей сейсморазведки, демонстрация эффективности и устойчивости сейсмического анализа, который с годами развивается и совершенствуется, достигая улучшенных результатов визуализации недр. Данные, обеспечивающие получение достоверной информации по сейсмогеологическому строению района исследований, получены в результате последовательных морских сейсмических работ 2003–2009 гг. После детального изучения были сформированы объективные представления о внутреннем строении блока, в частности о слоях меловых отложений, получены данные о наличии в осадочных породах сети разломов, сведения о возможных ловушках углеводородов, характере поровых давлений и типе флюидов. Однако из-за отсутствия пробуренных на исследуемом блоке скважин, сделанные выводы остаются предварительными, носят качественный характер и нуждаются в подтверждении дополнительными анализами. По результатам исследований были намечены наиболее перспективные участки для детальной интерпретации на основе анализа динамических характеристик сейсмических волн, данных сейсморазведки и выбора места заложения поисковой скважины.

Ключевые слова: сейсморазведка, Гвинейский залив, сейсмическая миграция, обработка, интерпретация, верхний мел, сейсмическая инверсия

Благодарности: Автор выражает благодарность всем, кто прямо или косвенно оказывал помощь при подготовке данной статьи, в частности специалистам британского офиса «Лукойл» в Лондоне и кандидату геолого-минералогических наук старшему научному сотруднику Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке К.С. Непеиной за оказание технической консультации.

Для цитирования: Онамун Д.Л.А., Дмитриев А.Г. Результаты 3D сейсморазведочных работ при поисках углеводородов в Гвинейском заливе // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 430–441. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-430-441>. EDN: TTLTBO.

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

Original article

Results of 3D seismic surveying for hydrocarbons
in the Gulf of GuineaDésiré Lucien Ayémoun Onamoun^{a,б}, Alexander G. Dmitriev^б^{a,б}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Seismic methods are among the most important tools in prospecting, exploration, evaluation and operation of oil and gas fields. The work includes three main stages: seismic data collection, their processing and interpretation. Seismic exploration can be carried out in 2D, 3D or 4D modifications. This study focuses on a 3D offshore seismic survey conducted in the deep shelf of the northern Gulf of Guinea in the Côte d'Ivoire Tano sedimentary basin. The purpose of the work is to assess the commercial prospects for discovering hydrocarbon deposits in the RUS-CIV block, identify the capabilities of seismic exploration, demon-



strate effectiveness and sustainability of seismic analysis, which has been developed and improved over the years, achieving improved subsurface visualization results. The data providing reliable information on the seismogeological structure of the area under investigation have been obtained as a result of successive marine seismic operations in 2003–2009. A detailed study allowed to form objective ideas about the internal structure of the block, in particular about the layers of Cretaceous deposits. Also, data were obtained on the presence of a fault network in sedimentary rocks, possible hydrocarbon traps, the nature of pore pressures and the type of fluids. However, the conclusions made remain preliminary, have a qualitative nature and should be confirmed by additional analyses due to the fact that there are no drilled wells in the studied block. Based on the study results, the most promising areas have been identified for detailed interpretation based on the analysis of the dynamic characteristics of seismic waves, seismic exploration data and the choice of the exploration well location.

Keywords: seismic exploration, Gulf of Guinea, seismic migration, processing, interpretation, Upper Cretaceous, seismic inversion

Acknowledgements: The author expresses gratitude to all those who directly or indirectly provided assistance in the preparation of the article. In particular, the author thanks the specialists from LUKOIL-Engineering, London Branch and the Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher at the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek K.S. Nepeina for technical advice.

For citation: Onamoun D.L.A., Dmitriev A.G. Results of 3D seismic surveying for hydrocarbons in the Gulf of Guinea. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):430-441. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-430-441>. EDN: TTLTBO.

Введение

Район исследования расположен на севере Гвинейского залива (в 100 км от берега) в осадочном бассейне Тано при глубине воды до 3 км. Первые нефтегазопроисковые работы в пределах залива, омывающего такие страны, как Кот-д'Ивуар, Гана, Того и Бенин, начали проводиться в конце XX в. В результате было обнаружено несколько десятков месторождений нефти и газа малого и среднего размеров. В 2001 г. компания Canadian Natural Resources объявила об открытии Баобаба – первого глубоководного месторождения нефти в Кот-д'Ивуаре. По оценке специалистов Геологической службы США (*англ.*: United States Geological Survey), потенциальные ресурсы нефти и газа Гвинейского залива составляют 978 млн баррелей нефти и 285 млрд м³ газоконденсата [1].

После открытия в 2007 г. гигантского глубоководного месторождения Джубили в соседней Гане в бассейне начался стремительный подъем геологоразведочной деятельности. Так, в 2009 г. в туронском турбидитовом комплексе с предполагаемыми извлекаемыми запасами нефти, превышающими 600 млн баррелей, было открыто месторождение Твенебоа с оценочными запасами, превышающими 240 млн баррелей нефти.

В 2021 г. в бассейне Тано на глубине 1200 м было обнаружено первое крупное нефтегазовое месторождение Балеин с предполагаемыми запасами в 2,5 млрд баррелей нефти и до 68 млрд м³ попутного газа. В 2024 г. в Кот-д'Ивуаре было открыто крупное месторождение Калао, при разведке которого было проведено бурение до 5000 м при глубине воды около 2200 м

с потенциальными запасами от 1 до 1,5 млрд баррелей нефтяного эквивалента. Ожидается, что в 2027 г. Кот-д'Ивуар войдет в десятку крупнейших производителей нефти в Африке.

Материалы и методы исследования

Геологическое строение глубоководного шельфа Кот-д'Ивуара детально освещено по результатам региональных гравиметрических и 3D сейсмических исследований в обобщающей работе компании Petroleum Geo-Services в партнерстве с Нефтяной комиссией (Petroleum Commission) Ганы, Главным управлением углеводородов (Direction Générale des Hydrocarbures) и PetroCi Holdings Кот-д'Ивуара [2]. Бассейн Тано возник в месте относительного тектонического покоя между зонами разломов Сен-Поль и Романше в виде расчлененных грабенов с мощным обломочным заполнением. Трансформный разлом Сен-Поль заканчивается изогнутым прибрежным разломом на восточном шельфе Кот-д'Ивуара, превращаясь в структуру «конский хвост» в месте соединения с зоной Романше на шельфе Ганы [3], что создает своеобразный разрез от мелководного шельфа до глубоководной части бассейна, подкрепленный мощной континентальной корой, постепенно утончающейся при переходе к океанической. В западной части бассейн Кот-д'Ивуара характеризуется трансформными разломами и грабенами, ориентированными субпараллельно по отношению к современному побережью. Переход от континентальной до океанической коры более резкий и четко виден на карте гравита-

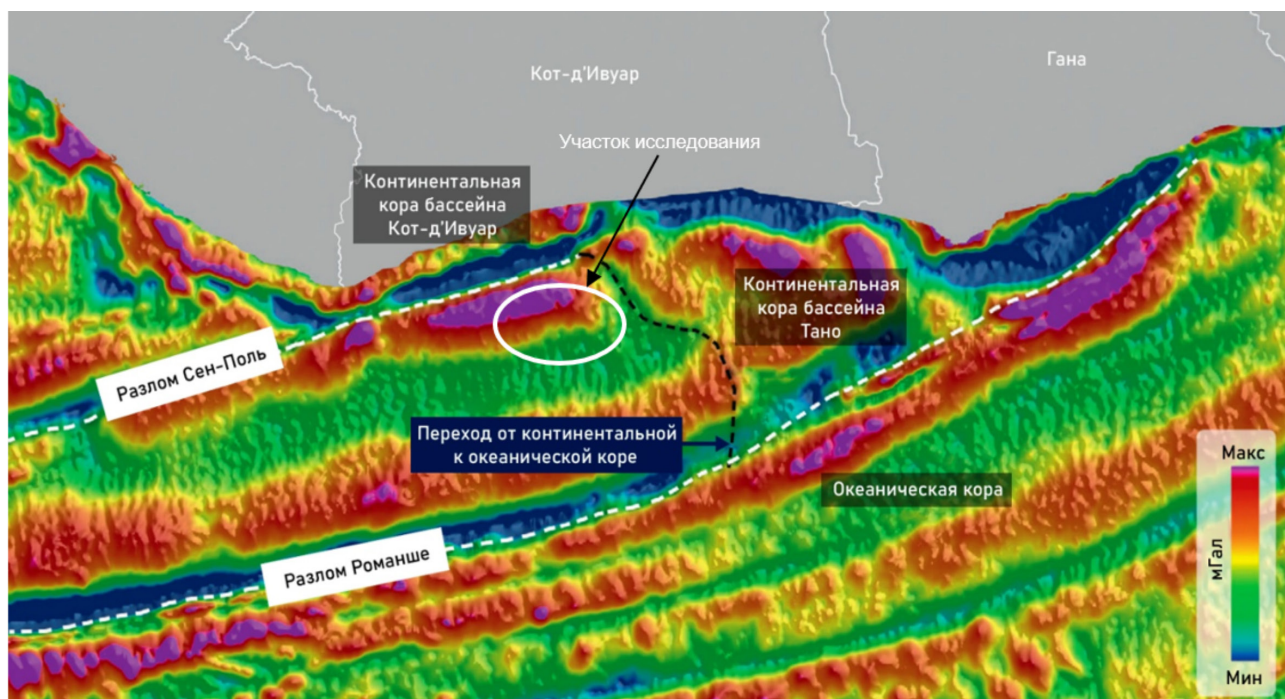


Рис. 1. Карта гравитационных аномалий Гвинейского залива в редукции Буге (согласно источнику [4] с изменениями авторов)

Fig. 1. Bouguer reduction gravity anomaly map of the the Gulf of Guinea (according to [4] with authors' alterations)

ционных данных в редукции Буге (рис. 1) [4]. Представленное явление произошло из-за разлома Сен-Поль, создавшего значительный гравитационный контраст между континентальной корой высокой плотности на севере и океанической корой низкой плотности в южной части.

Наиболее перспективным в пределах зоны экономических интересов Кот-д'Ивуара является участок RUS-CIV, расположенный в бассейне Тано, характеризующийся наличием стратиграфических и структурных ловушек, а также турбидитовых каналов мелового возраста. Участок, будучи близким к границе между континентальной и океанической корой, имеет глубину более 3 км и площадь свыше 2500 км².

Ближайшие нефтяные месторождения находятся на мелководном шельфе в верхней части крутого глубоководного склона на расстоянии 11–22 км к северу от границы блока. Большинство непосредственно соседствующих с блоком месторождений соответствуют меловым структурным замыканиям. С геологической точки зрения этот бассейн является идеальным для формирования активных углеводородных систем с оптимальным развитием нефтематеринского и коллекторско-седиментационного комплексов.

На момент проведения сейсморазведочных работ на блоке не пробурено ни одной

скважины. Скважина CIV-1, расположенная примерно в 30 км к северо-западу от района исследований при глубине воды 1000 м, была законсервирована на глубине 4100 м с отрицательными результатами (сухая скважина). В 2009 г. в 10 км к юго-западу от CIV-1 (в пределах того же повышенного гравитационного тренда), в 15 км от северо-восточного края блока была пробурена скважина CIV-2, в которой по целевым объектам в маастрихте и кампане была обнаружена только вода.

Данные бурения, а также результаты региональных 3D сейсмических исследований позволили сформировать обобщенную тектоно-стратиграфическую модель центральной части бассейна Тано и определить наиболее перспективные типы углеводородных систем. Глубинная региональная геология Кот-д'Ивуара и Ганы характеризуется терригенными отложениями от ордовика до среднего девона [3]. Во время очередного подъема уровня моря значительные участки территории были затоплены и морские эпиплатформенные зоны расширились на восток. Наступление моря продолжалось в позднем каменноугольном периоде, когда происходила аккумуляция осадочных отложений вплоть до триаса. Вверх по разрезу они сменялись более молодыми континентальными кремне-



земными терригенными отложениями позднеюрского периода [6]. Практически на всей территории блока на позднеюрских отложениях залегают образования мелового возраста, перекрытые с угловым несогласием палеоген-неогенового возраста (рис. 2).

Стратиграфический разрез бассейна Тано можно разделить на три тектоно-стратиграфические толщи, или фазы развития, с отчетливой историей формирования отложений и связанных с ними нефтяными системами.

Дотрансформационная фаза выходит на берег в Гане и состоит из толщ от докембрия до триаса включительно. Внутри бассейна дотрансформационные конгломераты и алевролиты юрского возраста, отложенные в континентальной обстановке, были вскрыты бурением. Вероятно, они возникли в результате эрозии поднятых плеч по краям бассейна [3]. Фаза синтрансформации в Гвинейский залив началась в берриасе и закончилась в конце альба. В части континентальной и окраинно-морской

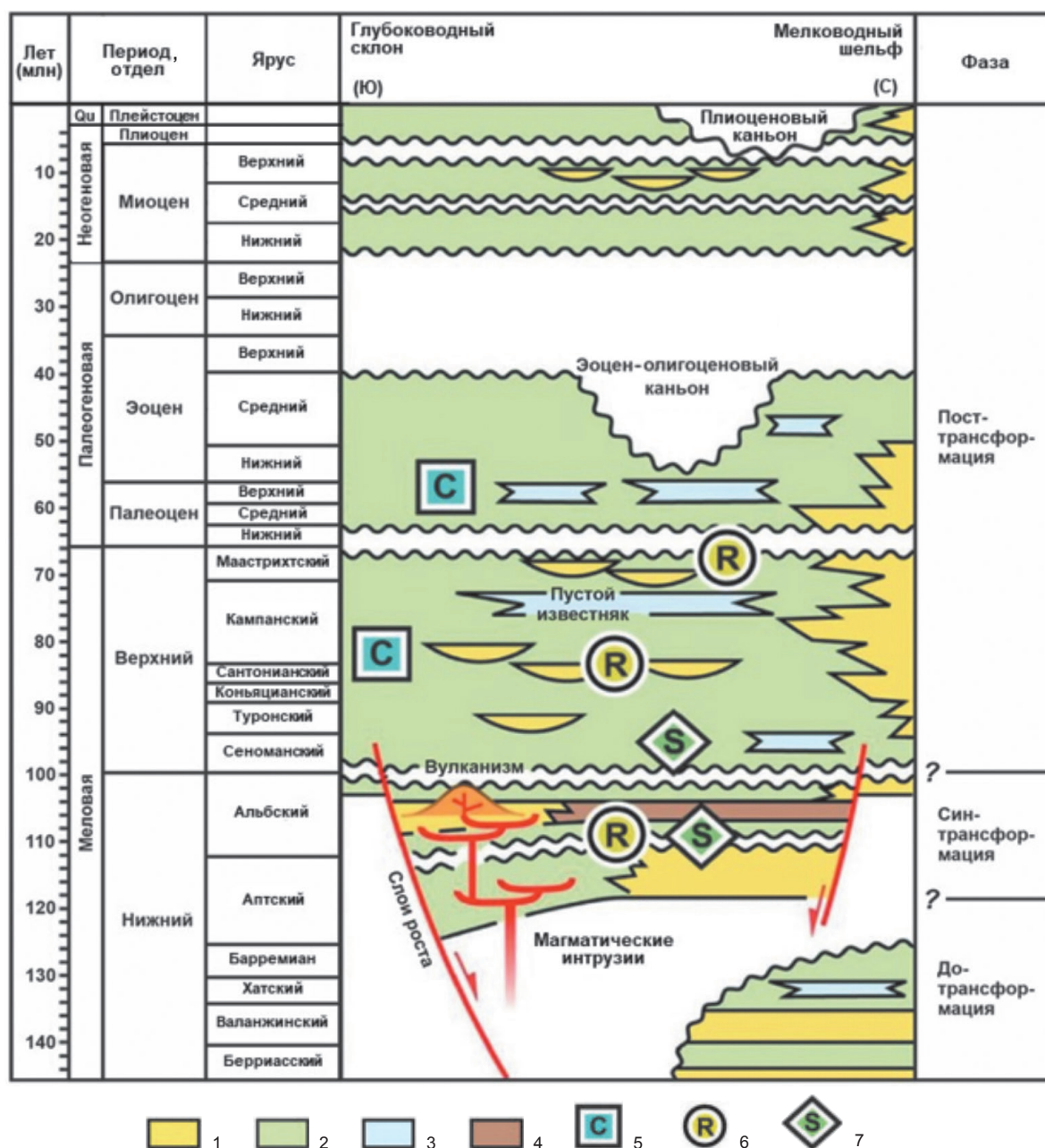


Рис. 2. Тектоно-стратиграфическая колонка бассейна Тано (согласно источникам [2, 6] с изменениями авторов):

1 – песчаник; 2 – глина; 3 – известняк; 4 – конгломерат; 5 – покрывка; 6 – резервуар; 7 – резервуар
Fig. 2. Tectonostratigraphic column of the Tano basin (according to [2, 6] with authors' alterations):
1 – sandstone; 2 – clay; 3 – limestone; 4 – conglomerate; 5 – seal; 6 – reservoir; 7 – reservoir



коры в этот период отлагались обломочные породы, образующие потенциальные коллекторы в форме речных и окраинных морских песчаников [6]. При этом в стратиграфическом разрезе прогрессировал рифтогенный переход материнских пород от более глубоких аптских озерных алевролитов и глин до более мелких среднеальбских морских алевритов и пелитов.

Расширение трансформных окраинных бассейнов прекратилось в конце альба, сопровождаясь обширным отложением морских алевролитов сеноман-туронского возраста [7]. В позднем альбе этот район сформировал непрерывный бескислородный морской разрез до турона [8], в котором имеется ряд перспективных нефтематеринских пород с высоким содержанием общего органического углерода.

Первые сейсморазведочные работы проводились в 2003 г. компанией Western Regent в восточной части блока RUS-CIV с использованием специализированного судна Geowave Master. В результате было отработано почти 800 км² профилей. Регистрация осуществлялась 384-канальной сейсмостанцией I/O MSX с использованием сейсмической косы длиной 4800 м. Возбуждение упругих колебаний производилось воздушной пушкой объемом 3000 дюймов с шагом по профилю 25 м, что обеспечило кратность наблюдений до 96. Обработка сейсмических данных позволила выделить многочисленные перспективные объекты по

альб-сеноманскому, туронскому и маастрихтскому комплексам. При этом были выявлены места литолого-стратиграфического выклинивания коллекторов вверх по восстанию пластов (что увеличивает риск аномально высоких пластовых давлений). Основными недостатками 2D сейсмических съемок являлись недостаточная плотность сети наблюдений, невозможность учета двойного сейсмического сноса и, как следствие, наличие погрешностей в локализации структур при больших углах наклона.

В 2007 г. геофизической компанией Western Geco (судно Western Regent) была покрыта 3D-сейсморазведкой западная часть блока. Совместная обработка материалов по западной и восточной частям доказала необходимость проведения детального изучения всего блока высококачественной 3D-съемкой. В связи с этим в 2009 г. специалистами компании WavefieldInseis (судно Geowave Master) дополнительно была отработана восточная часть (рис. 3). Регистрация осуществлялась 3840-канальной телеметрической сейсмостанцией Sercel Seal с использованием восьми 6-километровых сейсмических кос (480 каналов на косу). Возбуждение упругих колебаний производилось двумя 3460-дюймовыми воздушными пушками BOLT Long-Lifes с шагом по профилю 25 м. Размер бина при расстоянии между косами 100 м и номинальной кратности 60 составил 6,25×25 м.

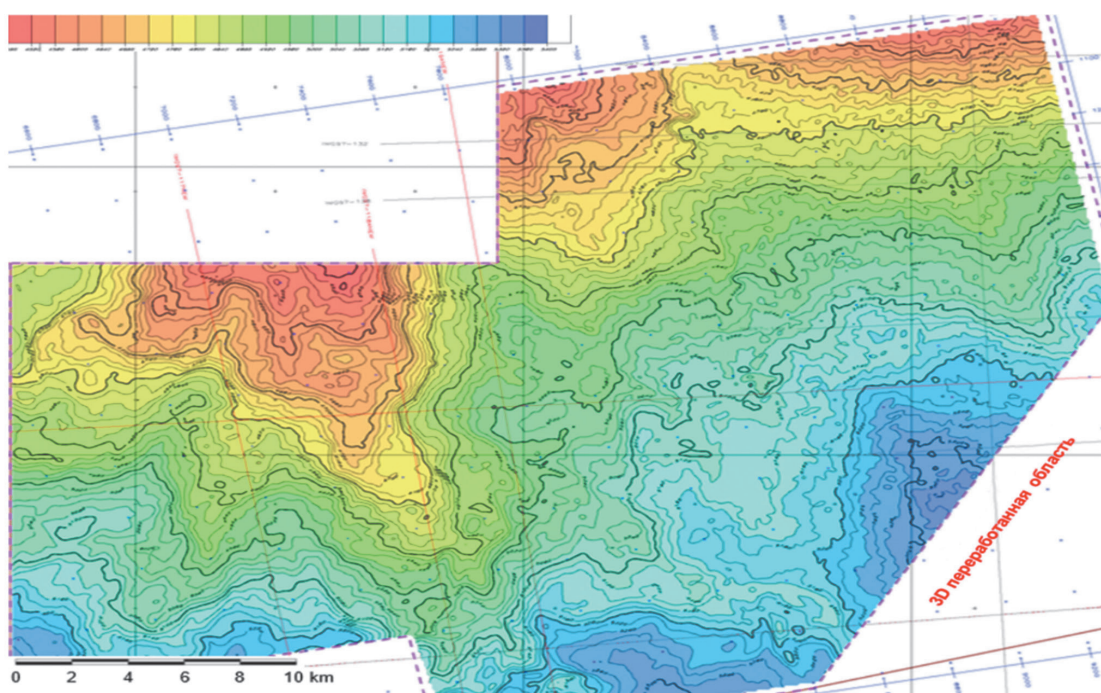


Рис. 3. Участок RUS-CIV: структурная карта изохрон t_0 по кровле верхнего мела
Fig. 3. RUS-CIV site: t_0 isochrone structural map along the Upper Cretaceous roof



Обработка материалов производилась с помощью системы Seismic Micro-Technology. Не останавливаясь на методике предварительной обработки, включавшей в себя такие стандартные процедуры, как коррекция усиления, различные переборы, энергетические анализы, частотная и скоростная фильтрация, сортировка, анализ вертикальных спектров, расчет и введение кинематических и статических поправок, суммирование, миграция и т. п., отметим, что основными задачами предварительной обработки являлись определение скоростного закона, сейсмостратиграфическая привязка выделенных горизонтов и построение полного сейсмического 3D-куба с сохранением амплитуд для дальнейшей динамической обработки и интерпретации. Дополнительно (с целью более обоснованной привязки к ближайшей скважине CIV-1) был

переобработан ряд сейсмических профилей, отработанных в 2003 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение исходной обработки материалов 2003 и 2007 гг. как для разрезов после временной миграции до суммирования, так и для разрезов после глубинной миграции показывает значительное улучшение прослеживаемости отражений от нижнего мела (рис. 4, а, б). Более высокое соотношение сигнала и шума хорошо видно по данным 2007 г., особенно по меловым горизонтам, что позволило лучше охарактеризовать эти депоцентры.

Сейсмические отражения в нижнем и верхнем меловых периодах выглядят более коррелируемыми и сосредоточенными на 3D 2007 г. Это обеспечило более корректную сейсми-

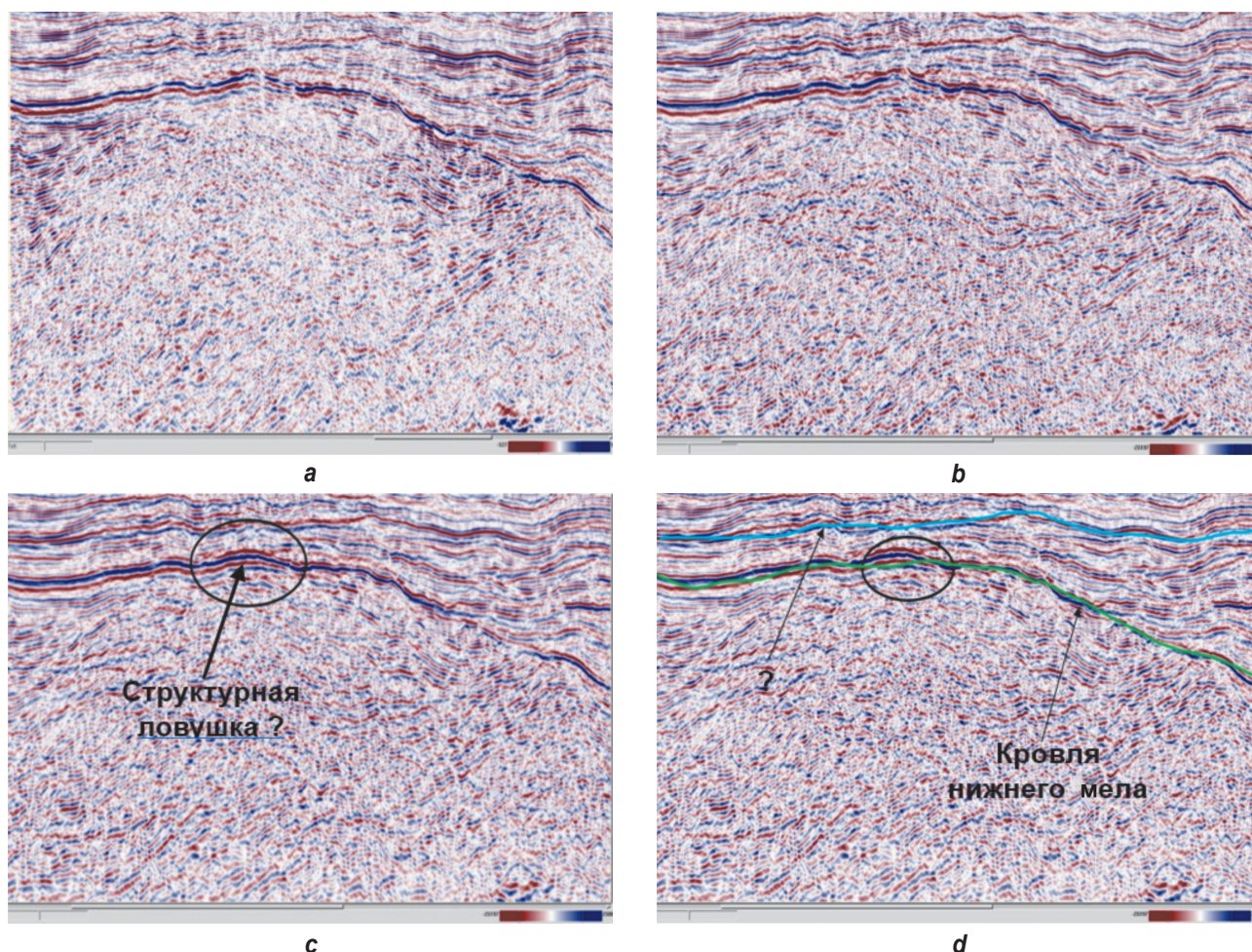


Рис. 4. Разрезы по профилю А:

а – временная 2D-миграция до суммирования; б – временная 3D-миграция до суммирования;
с – глубинная 3D-миграция; д – обратная во времени глубинная 3D-миграция

Fig. 4. Profile A sections:

а – 2D prestack time migration; б – 3D prestack time migration;
с – 3D depth migration; д – 3D time reverse depth migration



ческую интерпретацию указанных горизонтов. Кроме того, сейсмические амплитуды внутри верхнемеловой серии кажутся более однородными. Эквивалентность разрезов, полученных путем обратных преобразований глубинной миграции (рис. 4, с) во временную область (рис. 4, d), свидетельствует о корректном подборе скоростного закона и улучшении локальной фокусировки.

Сейсмические данные были инвертированы с помощью программного обеспечения InterWell® с целью максимизировать содержание и разрешение сигнала. В отсутствие скважинных данных и 2D сейсмических профилей, соединяющих скважины с изучаемым объемом, сейсмическая инверсия была основана на интерпретированных материалах 2003 г. и скоростях суммирования, повторно обработанных в 2007 г.

Теоретически влажные пески для рыхлых и высокопористых горизонтов при небольшой глубине залегания обычно имеют более низкий импеданс, чем окружающие глины. Акустический импеданс, или акустическая жесткость (произведение скорости распространения упругих колебаний на плотность пород) обычно имеет тенденцию к уменьшению при увеличении пористости. В более глубоких частях разреза, где под действием гидростатического давления наблюдается уплотнение отложений, водонасыщенные пески в основном демонстрируют более высокий импеданс,

что относится и к нижнемеловым отложениям к северу от изучаемого блока. Газонасыщенные пески имеют более низкие значения импеданса, чем глины. Гипотеза для интерпретации разрезов акустического импеданса заключалась в том, что его низкие значения указывают на присутствие газонасыщенных песков, особенно там, где отложения коррелируются с моделью осадконакопления. Однако из-за отсутствия контрольной скважины в инвертированной зоне остается большая неопределенность в корректности данных акустического импеданса и их интерпретации. На рис. 5 показан временной разрез по профилю В перевернутого куба акустического импеданса, иллюстрирующий повышение информативности различных способов цветных изображений [9].

Красные цвета обозначают низкие, а синие – высокие значения импеданса. Можно наблюдать их общее увеличение с глубиной из-за уплотнения пород и связанного с этим повышения скорости. Локально видны изменения значений импеданса, которые могут быть связаны с литологическими и/или флюидными изменениями. Например, ниже кровли нижнего мела четко выражен интервал низкого импеданса, который в случае газонасыщенных песков можно интерпретировать как пески нижнего мела. Данное явление, особенно сильно проявляется в западной части, по-видимому, постепенно уменьшается в разрезе

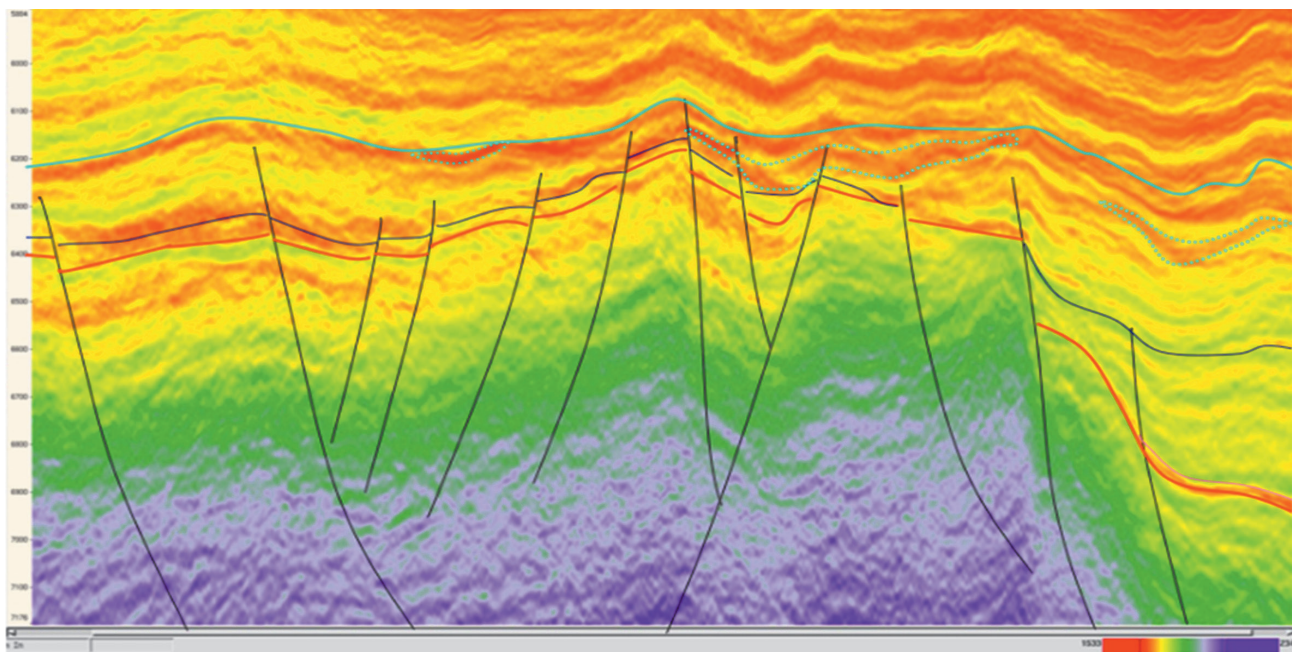


Рис. 5. Временной разрез акустического импеданса по профилю В
Fig. 5. Profile B time section of acoustic impedance



к восточной. Интервал исчезает на восточном краю структуры из-за нижнемеловой эрозии на территории.

Интерпретация верхних меловых акустических импедансов может быть не совсем корректной, однако горизонты с низким сопротивлением видны вдоль восточного склона поднятия и могут быть интерпретированы как трансгрессивные газонасыщенные пески. В пределах верхнего мелового интервала возможно наличие сложной русловой системы. Эти каналы соответствуют пакетам с относительно низким импедансом. Сейсмическая калибровка верхнего мела контролировалась экстраполяцией привязки CIV-1 и сейсмостратиграфической интерпретацией. Тем не менее из-за отсутствия сейсмических данных, связывающих непосредственно скважину CIV-1 с площадями, покрытыми 3D-сейсморазведкой, в верификации горизонта могут оставаться неопределенности.

Верхний мел соответствует проградированной толще в течении трансформной пассивной окраины с развитием турбидитовых комплексов каналов. Несколько верных турбидитовых палеорусел обнаруживаются на сейсмическом профиле С. Верхний мел представлен турбидитовым каналом и веерными коллекторами, заполненными сеноманскими/туронскими отложениями, материнские породы отложены на океанической коре (рис. 6). Карта структурных глубин показывает наличие большого турбидитового веера, связанного с несколькими палеоруслами. Отложение этой системы демонстрирует смещение на

запад. Различные элементы состоят из сложенных друг на друга турбидитовых каналов.

Детальный анализ скорости глубинной миграции до суммирования был использован для прогнозирования ее изменения в результате перепада давления в возможном месторасположении скважины. Градиент горного давления был рассчитан путем экстраполяции и интеграции графиков плотности соседних скважин и анализа 3D сейсмических данных скоростей глубинной миграции до суммирования. Прогнозирование осуществлялось несколькими методами, в частности Итона и Миллера [10], полученные результаты соответствовали друг другу. Прогнозное давление было эталонировано с результатами моделирования бассейна и оказалось последовательным в их отношении. Прогноз порового давления на основе моделирования бассейна и сейсмических скоростей показывает его рост, начиная с нижнего мела. В месте расположения перспективного объекта может существовать некоторый риск избыточного давления. Из-за отсутствия эталонных данных о блоке прогноз не может быть однозначным.

Получение изображений в глубоководных средах создает определенный набор проблем как при предварительной подготовке данных, так и при моделировании скоростей. К ним можно отнести разбросанные, трехмерные кратные волны, наложенный шум и низкоскоростные неглубокие аномалии, связанные с заполнением каналов и газовыми гидратами. Без хорошей обработки невозможно получить хорошие изображения недр для интерпре-

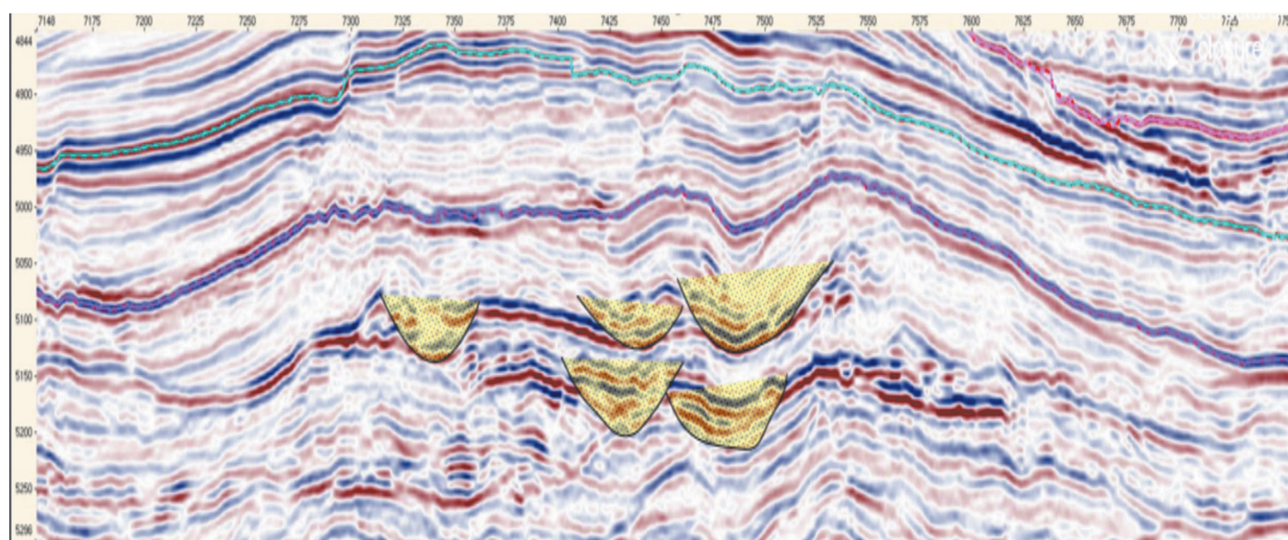


Рис. 6. Временной разрез по профилю С (веер сложных турбидитовых каналов в толще верхнего мела)
Fig. 6. Profile C time section (a range of complex turbidite channels in the Upper Cretaceous strata)



тации данных [11]. Именно поэтому данные в исследовании были повторно обработаны для извлечения из них лучшего.

Модели геологической среды, созданные в ходе геофизического анализа, всегда содержат погрешность, которая может быть как технической, так и человеческой. Это объясняется используемыми алгоритмами, математическими оценками, сложной анизотропией недр, имеющей свои особые свойства [12]. На ошибки глубины (оценивается по мигрированным данным) влияют такие факторы, как выбор метода (алгоритма) миграции, топография, исходные данные, модели скорости [13]. Необходимо добавить к этому уровень знаний и параметры изучаемой территории как на региональном, так и на локальном уровнях, а также опыт инженера или интерпретатора, проводящего геостатистические оценки. Таким образом, все указанные параметры сильно влияют на модель скорости. Мигрированные сейсмические изображения являются основными источниками информации о пространственном расположении разломов.

Ведя речь об ошибках в расположении разломов, уместно вспомнить работу [14], в которой представлена оценка неопределенностей, связанных со скоростью в расположении бокового разлома в изображении скоростной модели PSDM (*от англ.: problem solving and decision making* – решение проблем и принятие решений). Авторы предлагают оценивать неопределенности в расположении боковых дефектов на изображениях 3D PSDM после проведения общего качественного анализа всего объема 3D PSDM и выполнения подробного количественного анализа.

Для получения высоких результатов при обработке с последующей интерпретацией сейсмических данных 3D необходимы определенные минимальные условия, такие как высокий уровень качества съемки и высокое качество исходных данных [15]. Необходимо оптимизировать параметры полевых работ на этапах сбора первичной информации, разработки и внедрения новых программных комплексов обработки данных, а также новых технологий интерпретации и построения моделей. Это имеет свою, зачастую высокую, цену, но лучше заплатить, чем работать в условиях неопределенности и риска будущих неудач [16].

Описанные выше методы были полезны для достижения цели в рамках проведенного

исследования, однако существуют и другие способы, которые в сочетании друг с другом могли бы улучшить или подтвердить полученные результаты. Приведем три примера.

1. И.Ю. Степанов с соавторами [17] предлагают составить комплекс формул, наиболее подходящих для расчетов сейсмических характеристик на простом и удобном языке программирования Python. Таким образом, исследователи сформировали математический аппарат, который можно использовать в качестве альтернативного метода обработки и анализа сейсмических характеристик без использования внешнего программного обеспечения.

2. М.И. Протасов с соавторами [18] изучали влияние графика обработки сейсмических данных на качество изображений, построенных по рассеянным волнам (рассеянные волны использовались для построения сейсмодифракционных изображений, предоставляющих дополнительную информацию, которая помогает найти и охарактеризовать объекты дифракции/рассеяния, включая разломы, трещины и каверны). Аналогичные результаты были получены при изучении рассеянных волн и прогнозе аномалий высокого пластового давления, обусловленных наличием рапопроявлений в южной части Восточной Сибири [19].

3. Т.А. Петроченко, Г.М. Митрофанов и их коллеги [20] показали, как использовать физическое моделирование для получения сейсмических данных, аналогичных тем, которые регистрируются во время полевых исследований. Им удалось продемонстрировать, что характеристики близки к наблюдаемым в реальном эксперименте. Авторы предлагают возможность апробации методов обработки, используемых в практике сейсморазведки, на лабораторных данных, моделирующих сейсморазведку.

Заключение

Исследование показало эффективность проведения 3D сейсморазведочных работ для оптимизации прогноза и описания характеристик районов, перспективных по запасам углеводородов. Обработка сейсмических данных позволила выделить многочисленные перспективные объекты по альб-сеноманскому, туронскому и маастрихтскому комплексам. Благодаря сейсмическим данным был выявлен и локализован ряд не только структурных ловушек, но и русловых систем. Изучен их ли-



тологический состав и свойства, способствующие обнаружению областей вероятного скопления углеводородов. При этом были выявлены перспективные участки литолого-стратиграфического выклинивания коллекторов вверх по восстанию пластов, которые характеризуются увеличением рисков, связанных с наличием аномально высоких пластовых давлений.

Наблюдение и интерпретация геологических событий на данном этапе изучения носят качественный характер. Основная идея распределения потенциальных коллекто-

ров может быть выработана путем анализа кросс-плотов, в качестве объекта бурения для уточнения количественных показателей могут быть предложены области с хорошими коллекторскими свойствами. В связи с этим настоятельно рекомендуется обратить внимание на области, оцифрованные в результате анализа перекрестных графиков, и углубить этот первый и предварительный этап анализа путем проведения количественных исследований. Это поможет получить более надежные результаты и сформировать реальное представление о приуроченности углеводородов.

Список источников

1. Brownfield M.E., Charpentier R.R. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea province of West Africa: U.S. Geological Survey Bulletin 2207-C. Reston: U.S. Geological Survey, 2006. 32 p.
2. Burrell A. Understanding tectonic development and the implications for prospectivity offshore Côte d'Ivoire and Ghana // *First Break*. 2024. Vol. 42. Iss. 5. P. 53–58. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2024039>.
3. Basile C., Mascle J., Guiraud R. Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain // *Journal of African Earth Sciences*. 2005. Vol. 43. Iss. 1–3. P. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.011>.
4. Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science*. 2024. Vol. 346. Iss. 6205. P. 65–67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>.
5. Martin G. Geologie des Küstengebietes von Nordwest-Africa südlich der Sahara // *Neue Erkenntnisse aus der Erdölexploration* Giessener Geologische Schriftenreihe. 1982. N. 30. S. 150.
6. Scarselli N., Duval G., Martin J., McClay K., Toothill S. Insights into the early evolution of the Côte d'Ivoire margin (West Africa) // *Geological Society, London, Special Publications*. 2018. Vol. 476. P. 109–133. <https://doi.org/10.1144/SP476.8>.
7. Macgregor D., Robinson J., Spear G. Play fairways of the Gulf of Guinea transform margin // *Geological Society, London, Special Publications*. 2013. Vol. 207. Iss. 1. P. 131–150. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.207.7>.
8. Tissot B., Demaison P., Masson P., Delteil J.R., Conbaz A. Paleoenvironment and petroleum potential of Middle Cretaceous black shales in Atlantic Basins // *AAPG Bulletin*. 1980. Vol. 64. Iss. 12. P. 2051–2063.
9. Дмитриев А.Г., Дмитриева М.А., Ковалев А.С. Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных // *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47. № 1. С. 6–16. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW.
10. Zhang J. Pore pressure prediction from well logs methods modifications and new approaches // *Earth-Science Reviews*. 2011. Vol. 108. Iss. 1–2. P. 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.001>.
11. Prakash A., Subrata C. An innovative way of 3D velocity model building for PSDM Processing a case study from Andaman deep water basin, India // 11th Biennial International Conference and Exposition. Jaipur, 2015. Режим доступа: https://spgindia.org/11_biennial_form/an-innovative-way-of-3d-velocity-model-building-for-psdm-processing-a-case-study-from-andaman-deep-water-basin-india-jaipur-2015.pdf (дата обращения: 15.05.2024).
12. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes – a historical perspective // *Geophysics*. 2005. Vol. 70. Iss. 5. P. 3SO–28SO. <https://doi.org/10.1190/1.2098670>.
13. Roque F., Vasconcellos G., Pontes R., Maul A., González Farías M. Assessment of depth positioning uncertainties for PSDM seismic data // Fifteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society (Rio de Janeiro, 31 July – 3 August 2017). Houston: SEG, 2017. P. 1813–1817. <https://doi.org/10.1190/sbgf2017-357>.
14. Birdus S., Ganivet V., Artemov A., Teakle R., Phythian P. Estimation of uncertainties in fault lateral positioning on 3D PSDM seismic image – example from the NW Australian Shelf // 77th EAGE Conference and Exhibition 2015 (Madrid, 1–4 June 2015). Madrid: IFEMA, 2015. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412730>.
15. Половников С.С., Табрин В.Л., Шабалин С.В. Кинематическая обработка сейсморазведочных данных, полученных в сложных сейсмогеологических условиях // *Вести газовой науки*. 2018. № 3. С. 315–321. EDN: YVRBNZ.
16. Ажгалиев Д.К., Исенов С.М., Каримов С.Г. Новые возможности обработки и интерпретации сейсмических данных в оценке перспективности локальных объектов // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-48-59>. EDN: AGLKRL.
17. Степанов И.Ю., Дорн Е.В., Степанов Ю.А. Подготовка исходных сейсмических данных для моделирования тектонического разлома угольного массива // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2024. № 5. С. 5–16. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_5. EDN: JJLUON.
18. Протасов М.И., Сорокин А.С., Хуснитдинов Р.Р., Фагеререва В.А. Влияние графа обработки сейсмических данных на качество изображений построенным по рассеянным волнам // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, Новосибирск, 15–17 мая 2024 г.: сб. материалов в 8 т. Т. 2: Международная научная*



конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». Новосибирск: Изд-во СГУГиТ, 2024. № 4. С. 66–71. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-2-4-66-71>.

19. Смирнов А.С., Вахромеев А.Г., Ерохин Г.Н., Дмитриев А.Г. Прогноз рапопроявлений юга сибирской платформы по сейсморазведочным данным // Геофизика. 2023. № 2. С. 93–101. <https://doi.org/10.34926/geo.2023.18.86.011>. EDN: OBKGUT.

20. Петроченко Т.А., Задоев А.Ю., Дучков А.А., Митрофанов Г.М. Тестирование алгоритмов обработки сейсмических данных на результатах лабораторного моделирования // Геофизические технологии. 2022. № 2. С. 107–117. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-2-107>. EDN: GLFSKA.

References

1. Brownfield M.E., Charpentier R.R. *Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea province of West Africa: U.S. Geological Survey Bulletin 2207-C*. Reston: U.S. Geological Survey; 2006, 32 p.
2. Burrell A. Understanding tectonic development and the implications for prospectivity offshore Côte d'Ivoire and Ghana. *First Break*. 2024;42(5):53-58. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2024039>.
3. Basile C., Mascle J., Guiraud R. Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain. *Journal of African Earth Sciences*. 2005;43(1-3):275-282. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.011>.
4. Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*. 2024;346(6205):65-67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>.
5. Martin G. *Geologie des Küstengebietes von Nordwest-Africa südlich der Sahara. Neue Erkenntnisse aus der Erdölexploration Giessener Geologische Schriftenreihe*. 1982;30:50. (In German).
6. Scarselli N., Duval G., Martin J., McClay K., Toothill S. Insights into the early evolution of the Côte d'Ivoire margin (West Africa). *Geological Society, London, Special Publications*. 2018;476:109-133. <https://doi.org/10.1144/SP476.8>.
7. Macgregor D., Robinson J., Spear G. Play fairways of the Gulf of Guinea transform margin. *Geological Society, London, Special Publications*. 2013;207(1):131-150. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.207.7>.
8. Tissot B., Demaison P., Masson P., Delteil J.R., Conbaz A. Paleoenvironment and petroleum potential of Middle Cretaceous black shales in Atlantic Basins. *AAPG Bulletin*. 1980;64(12):2051-2063.
9. Dmitriev A.G., Dmitrieva M.A., Kovalev A.S. Dynamic range issues and image information content when visualizing seismic data. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):6-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW.
10. Zhang J. Pore pressure prediction from well logs methods modifications and new approaches. *Earth-Science Reviews*. 2011;108(1-2):50-63. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.001>.
11. Prakash A., Subrata C. An innovative way of 3D velocity model building for PSDM Processing a case study from Andaman deep water basin, India. In: *11th Biennial International Conference and Exposition*. Jaipur; 2015. Available from: https://spgindia.org/11_biennial_form/an-innovative-way-of-3d-velocity-model-building-for-psdm-processing-a-case-study-from-andaman-deep-water-basin-india-jaipur-2015.pdf [Accessed 15th May 2024].
12. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes – a historical perspective. *Geophysics*. 2005;70(5):3SO-28SO. <https://doi.org/10.1190/1.2098670>.
13. Roque F., Vasconcellos G., Pontes R., Maul A., González Fariás M. Assessment of depth positioning uncertainties for PSDM seismic data. In: *Fifteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. 31 July – 3 August 2017, Rio de Janeiro. Houston: SEG; 2017, p. 1813-1817. <https://doi.org/10.1190/sbgf2017-357>.
14. Birdus S., Ganivet V., Artemov A., Teakle R., Phythian P. Estimation of uncertainties in fault lateral positioning on 3D PSDM seismic image – example from the NW Australian shelf. In: *77th EAGE Conference and Exhibition 2015*. 1–4 June 2015, Madrid. Madrid: IFEMA; 2015, p. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412730>.
15. Polovnikov S.S., Tabrin V.L., Shabalin S.V. Kinematic processing of seismic data acquired in challenging seismic-and-geological environment. *Vesti gazovoj nauki*. 2018;3:315-321. (In Russ.). EDN: YVRBNZ.
16. Azhgaliev D.K., Isenov S.M., Karimov S.G. New opportunities for processing and interpreting seismic data in estimating the viability of local objects. *News of the Ural State Mining University*. 2019;1:48-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-48-59>. EDN: AGLKRL.
17. Stepanov I.Yu., Dorn E.V., Stepanov Yu.A. Preparation of initial seismic data for modeling tectonic fault in coal body. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2024;5:5-16. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_5. EDN: JJLUON.
18. Protasov M.I., Sorokin A.S., Khusniddinov R.R., Fagereva V.A. The influence of the seismic data processing workflow on the quality of scattering waves images. In: *Interjekspo GEO-Sibir'. XX Mezhdunarodnyj nauchnyj kongress. 15–17 May 2024, Novosibirsk: sb. materialov v 8 t. T. 2: Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravlenija i tehnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Jekonomika. Geojekologija" = Interexpo GEO-Siberia. 20th International Scientific Congress, Novosibirsk, May, 15–17, 2024: collected materials in 8 volumes. Volume 2: International Scientific Conference "Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies for Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economy. Geoecology"*. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies; 2024, no. 4, p. 66-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-2-4-66-71>.
19. Smirnov A.S., Vakhromeev A.G., Erokhin G.N., Dmitriev A.G. Brine-bearing reservoirs prediction based on seismic data in the south of the siberian craton. *Journal of geophysics*. 2023;2:93-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.34926/geo.2023.18.86.011>. EDN: OBKGUT.



20. Petrochenko T.A., Zadoev A.Yu., Duchkov A.A., Mitrofanov G.M. Testing processing algorithms for seismic data from laboratory modeling. *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2022;2:107-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-2-107>. EDN: GLFSKA.

Информация об авторах / Information about the authors



Онамун Дезире Люсьен Айемун,
аспирант,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ donamoun@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-8323-3755>
Désiré Lucien Ayémoun Onamoun,
Postgraduate Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ donamoun@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-8323-3755>



Дмитриев Александр Георгиевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор-консультант департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ a.g.dmitriev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>
Alexander G. Dmitriev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Consulting Professor of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ a.g.dmitriev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Д.Л.А. Онамун – проведение исследования, формальный анализ, написание черновика рукописи.

А.Г. Дмитриев – разработка концепции, разработка методологии, формальный анализ, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Désiré Lucien Ayémoun Onamoun – investigation, formal analysis, writing – original draft.

Alexander G. Dmitriev – conceptualization, methodology, formal analysis, writing – review & editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 10.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 10.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.

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

Обзорная статья

УДК 550.822.7

EDN: JQRBUS

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-442-452

**О системах контроля и телеметрии процесса колонкового бурения скважин в ледниках и подледниковых горных породах электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле****В.С. Шадрин^a, А.В. Большунов^b, В.Я. Климов^c**^{a-c}Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Целями исследования являлись изучение и систематизация актуальных научных работ по системам контроля и телеметрии режимных параметров колонкового бурения скважин в ледниках и подледниковых горных породах электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле. В ходе проведенной работы был выполнен обзор систем контроля и телеметрии режимных параметров колонкового бурения электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле, которые используются при бурении скважин во льду и подледниковых горных породах на островах в Арктике и Антарктиде отечественными и зарубежными специалистами. На основании полученных результатов определена единая концепция рассмотренных систем, а также обозначены их особенности. Предложена функциональная блок-схема системы контроля и телеметрии режимных параметров колонкового бурения снарядами на грузонесущем кабеле. С учетом выявленных особенностей и применяемых технических решений в созданных отечественными и зарубежными специалистами системах контроля и телеметрии авторами статьи сформулированы требования к системе контроля и телеметрии процесса колонкового бурения горных пород возвратно-вращательным способом. Данные требования будут учтены при разработке системы контроля и телеметрии возвратно-вращательного способа бурения скважин в подледниковых горных породах, что является одним из этапов исследования, проводимых в рамках разработки и обоснования технологии отбора керна подледниковых горных пород в Антарктиде динамически уравновешенным буровым снарядом на грузонесущем кабеле.

Ключевые слова: Антарктида, Арктика, колонковое бурение, колонковые электромеханические буровые снаряды, система контроля и телеметрии

Финансирование: Исследование проведено с помощью субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2024 г. (№ FSRW-2024-0003).

Благодарности: Коллектив авторов выражает благодарность сотруднику лаборатории технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Евгению Витальевичу Шишкину за помощь в подготовке статьи.

Для цитирования: Шадрин В.С., Большунов А.В., Климов В.Я. О системах контроля и телеметрии процесса колонкового бурения скважин в ледниках и подледниковых горных породах электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 442–452. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-442-452>. EDN: JQRBUS.

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

Review article

On control and telemetry systems of borehole core drilling in glaciers and subglacial rocks with electromechanical cable-suspended drills**Vyacheslav S. Shadrin^a, Alexey V. Bolshunov^b, Vladimir Ya. Klimov^c**^{a-c}Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The purpose of the research is to study and systematize relevant scientific works on monitoring and telemetry systems for operating parameters of borehole core drilling in glaciers and subglacial rocks with electromechanical ca-

© Шадрин В.С., Большунов А.В., Климов В.Я., 2024



ble-suspended drills. The study includes a review of monitoring and telemetry systems for operational parameters of core drilling with electromechanical cable-suspended drills, which are used by domestic and foreign specialists when drilling wells in ice and subglacial rocks on islands in the Arctic and Antarctica. Based on the results obtained, a unified concept of the considered systems is defined and their features are outlined. A functional block diagram of a monitoring and telemetry system for operating parameters of core drilling with electromechanical cable-suspended drills is proposed. Taking into account the identified features and applied technical solutions in the monitoring and telemetry systems created by domestic and foreign specialists, the authors of the article formulate the requirements for the monitoring and telemetry system of the core drilling of rocks using a reciprocating rotary method. These requirements will be taken into account when developing a system for monitoring and telemetry of the reciprocating rotary method of drilling boreholes in subglacial rocks, which is one of the stages of the research conducted as a part of development and justification of the technology of subglacial rock core sampling in Antarctica by a dynamically balanced cable-suspended drill.

Keywords: Antarctica, Arctic, core drilling, cable-suspended electromechanical drills, telemetry and drilling control system

Funding: The research was performed with the help of the subsidy for the implementation of the state assignment in the field of scientific activity for 2024 (no. FSRW-2024-0003).

Acknowledgements: The team of authors thank Evgeniy V. Shishkin, the staff member of the Laboratory of Well Drilling Technology and Equipment in Vostok Station Conditions of "Arktika" Research Center, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University for his assistance in preparation of the article.

For citation: Shadrin V.S., Bolshunov A.V., Klimov V.Ya. On control and telemetry systems of borehole core drilling in glaciers and subglacial rocks with electromechanical cable-suspended drills. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):442-452. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-442-452>. EDN: JQRBUS.

Введение

Самым достоверным источником геологических, микробиологических и палеоклиматических данных является керновый материал. Отбор уникальных образцов кернов льда и подледниковых горных пород (ПГП), изучение которых позволит реконструировать историю развития Земли [1, 2], обуславливает необходимость в разработке технических средств и технологий колонкового бурения скважин применительно к геолого-техническим особенностям исследуемого региона. Проведенный анализ результатов обзора отечественных и зарубежных проектов [3] позволил выявить актуальное направление исследований в области совершенствования и разработки технических средств и технологий колонкового бурения ледников и ПГП в Антарктиде [4–6].

В настоящее время в лаборатории технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II ведутся работы, направленные на разработку новых и совершенствование существующих технологий и технических средств исследования ледников [7–9] и подледниковых сред [10, 11]. В рамках разработки технологии колонкового бурения скважин в ПГП электромеханическим снарядом на грузонесущем кабеле, реализующим возвратно-вращательный способ разрушения горных пород [12], выполняется разработка системы контроля и телеметрии процесса колонкового бурения скважин.

Материалы и методы исследования

Целями исследования являлись изучение и систематизация актуальных научных работ по системам контроля и телеметрии режимных параметров колонкового бурения скважин в ледниках и ПГП электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле (ГНК). Для их достижения были поставлены следующие задачи:

1) выполнение обзора отечественных и зарубежных проектов колонкового бурения скважин во льду и ПГП снарядами на ГНК, в достаточной мере раскрывающих особенности используемых систем контроля и телеметрии процесса бурения;

2) проведение анализа собранных данных и результатов;

3) формирование рекомендаций по разработке системы контроля и телеметрии режимных параметров колонкового бурения снарядами на ГНК.

В начале 1980-х гг. специалистами Ленинградского горного института (ныне Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) был разработан колонковый электромеханический буровой снаряд (КЭМС) на ГНК. Он предназначался для колонкового бурения скважин во льду глубиной до 4000 м, диаметром 135 мм и использовался при проведении буровых работ на ледниках Вавилова и Академии Наук, а также в Антарктиде. Снаряд состоял из кабельного замка, распорного устройства, электроотсека с расположенными



ми внутри датчиками осевой нагрузки и проворота, погружного электродвигателя (ПЭД), редукторного узла, циркуляционного насоса и секции колонковых труб с буровой коронкой (БК). Вращение БК и вала циркуляционного насоса осуществлялось посредством общего приводного трехфазного асинхронного электродвигателя и планетарного редуктора.

Управление технологическим процессом, включающим в себя спуско-подъемные операции и бурение, проводилось с помощью следующих приборов: пульта управления с встроенными аналоговыми приборами; компьютера с установленным программным обеспечением и многофункционального осциллографа, благодаря которому осуществлялся контроль проворота бурового снаряда (рис. 1).

На приборной панели пульта управления отображались глубина бурения, величина осевой нагрузки на забой, значение напряжения на обмотках статора ПЭД бурового снаряда. На экране компьютера в режиме реального времени демонстрировалась измеряемая мультиметром величина силы тока (мА), потребляемого ПЭД во время бурения. По получаемому графику токовой характеристики ПЭД, выводимому на экран компьютера в режиме реального времени, имелась возмож-

ность судить о текущем состоянии процесса бурения.

Перемещение бурового снаряда в скважине осуществлялось с помощью грузонесущего кабеля, состоящего из семи медных и одной несущей жил (рис. 2, а). По первой медной жиле осуществлялась передача данных о величине осевого усилия на забой, по второй – с датчика проворота бурового снаряда, по оставшимся жилам осуществлялась подача напряжения на обмотки статора ПЭД. В связи со значительной длиной ГНК для снижения потерь напряжения на обмотках ПЭД токоведущие жилы кабеля были подключены параллельно.

Рассмотренная система контроля и телеметрии была полностью построена на аналоговых приборах измерения и передачи данных с забоя на поверхность. Весомая задержка передачи данных, необходимых для оценки состояния процесса бурения, приводила к несвоевременному контролю бурения при возникновении нештатных ситуаций на забое скважины.

В 2003 г. американскими инженерами научно-исследовательского Висконсинского университета в Мадисоне (*англ.*: University of Wisconsin–Madison) был создан колонковый электромеханический буровой снаряд DISC на ГНК [13, 14], в концепцию которого были заложены



Рис. 1. Система контроля и телеметрии режимных параметров бурения колонковым электромеханическим буровым снарядом:

1 – приборная панель пульта управления; 2 – компьютер; 3 – многофункциональный осциллограф

Fig. 1. Control and telemetry system for operating parameters using electromechanical core drilling tool:

1 – control panel; 2 – computer; 3 – multifunctional oscilloscope

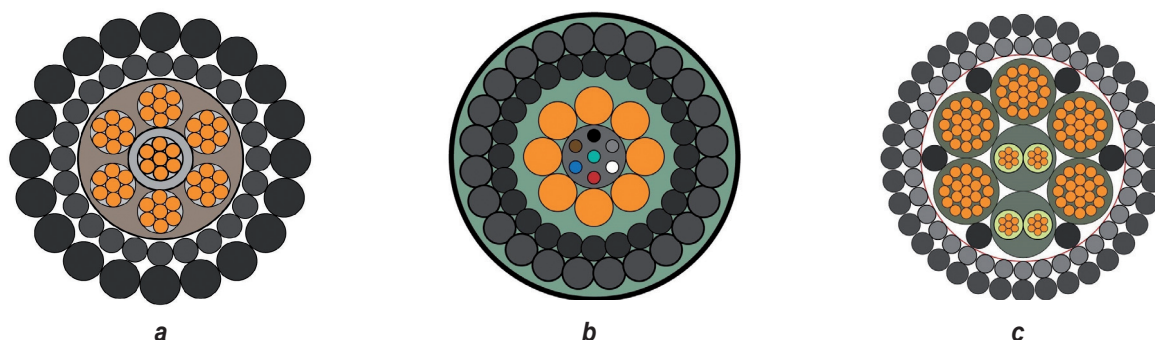


Рис. 2. Конструкция грузонесущих кабелей буровых снарядов:

*а – кабеля колонкового электромеханического бурового снаряда;
б – кабеля бурового снаряда DISC; с – кабеля бурового снаряда IBED*

Fig. 2. Design of load-bearing cables of drilling rigs:

a – electromechanical core drilling tool cable; b – DISC drill cable; c – IBED drill cable

жены основные технические решения, ранее используемые при создании таких буровых снарядов, как КЭМС, EPICA и PICO. DISC предназначался для колонкового бурения скважин во льду глубиной до 4000 м и диаметром 170 мм.

Управление технологическим процессом, включающим в себя спуско-подъемные операции и процесс бурения, осуществлялось с помощью системы телеметрии, состоящей из трех отдельно функционирующих компьютеров с мониторами и аналого-цифровых преобразовательных устройств (рис. 3, а) [15]. Первый компьютер был предназначен для управления большим и малым двигателями приводной лебедки, необходимыми для выполнения спуско-подъемных операций и подачи бурового снаряда на забой. Второй отвечал за управление буровым снарядом. На экране его монитора отображались следующие режимные параметры: величина токовой нагрузки ПЭД БК; значение осевой нагрузки на забой скважины; угол проворота распорного устройства бурового снаряда; частота вращения БК; частота вращения вала циркуляционного насоса; а также токовая нагрузка электродвигателя циркуляционного насоса, глубина бурения, величина рейсовой проходки, давление и температура в скважине (рис. 3, б, с). Третий компьютер являлся вспомогательным и предназначался для чтения данных, поступающих на первый и второй, и последующего хранения их в базе на индивидуальном накопителе. Информация, хранящаяся в базе данных, позволяла буровикам проводить анализ параметров предыдущих буровых рейсов и принимать необходимые меры во время подготовки бурового снаряда к последующим рейсам с целью успешного выполнения работ на дальнейших интервалах скважины.

ГНК бурового снаряда состоял из защитной брони, восемью медных токовых жил и установленного внутри шестижильного оптоволоконного кабеля [16] (см. рис. 2, б). С помощью восьми токовых жил осуществлялась подача напряжения на обмотки ПЭД бурового снаряда и электродвигателя циркуляционного насоса, а передача данных с датчиков, установленных внутри бурового снаряда, выполнялась по шести жилам оптоволоконного кабеля. В связи со значительной протяженностью ГНК для снижения потерь параметров сигнала в оптоволоконном кабеле применялись трансиверы. Разработанный оптоволоконный кабель имел достаточно высокую оптическую чувствительность, а также скорость измерения и передачи сигналов (до 38400 бод), тем самым позволяя осуществлять оперативный контроль технологическим процессом и принимать верные решения при возникновении нештатных ситуаций во время бурения.

В 2017 г. специалистами по изучению полярных регионов Земли из Цзилиньского университета в Китае (англ.: Jilin University) был создан колонковый электромеханический буровой снаряд IBED на грузонесущем кабеле [17, 18]. Снаряд IBED использовался для колонкового бурения скважин во льду и отбора керна ПГП, залегающих на глубине до 1400 м. IBED имел несколько модификаций нижней конструктивной части: колонковый набор для бурения в снежно-фирновой толще, колонковый набор для бурения мореносодержащего льда и колонковый набор для бурения в твердых ПГП. Система телеметрии и контроля состояла из главного компьютера, пульта управления лебедкой и метеорологической станции (рис. 4) [19].

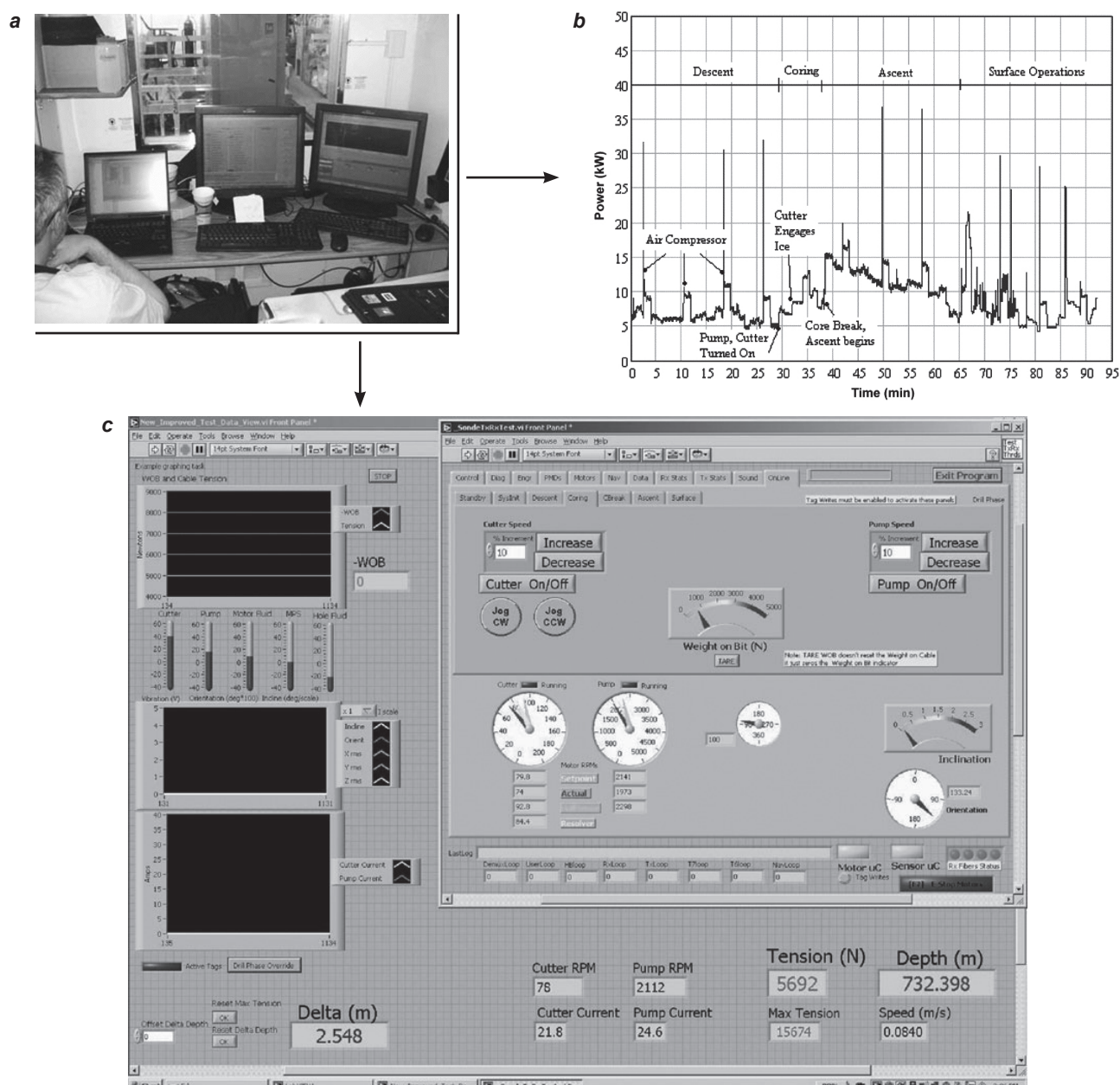


Рис. 3. Система контроля и телеметрии режимных параметров бурения снарядом DISC:
а – компьютеры для контроля процесса бурения; б – графики процесса бурения, выводимые на экран главного компьютера в режиме реального времени; в – окна программного обеспечения с отображаемыми режимными параметрами бурения и дополнительными сведениями [15]

Fig. 3. Control and telemetry system of DISC drill operating parameters:

а – drilling process monitoring computers; б – real-time drilling graphs displayed on the main computer screen; в – software windows showing operating parameters of drilling and additional information [15]

На мониторе основного компьютера в режиме реального времени отображались следующие основные контролируемые параметры: токовая нагрузка на ПЭД БК; осевая нагрузка на забой скважины; величина проворота статорной части бурового снаряда; частота вращения БК; частота вращения приводного вала циркуляционного насоса. Помимо отображения основных измеряемых параметров, велась запись давления и температуры в скважине, пространствен-

ного положения снаряда в скважине на забое (азимутальный и зенитный углы).

Грузонесущий кабель [20] бурового снаряда состоял из защитной брони, пяти медных силовых жил и двух жил для передачи данных с забоя на поверхность (см. рис. 2, с). Первые три медные жилы использовались для передачи электрической энергии на обмотки электродвигателя бурового снаряда, две другие предназначались для подачи питания на пре-



Рис. 4. Система контроля и телеметрии режимных параметров бурения снарядом IBED
(согласно источнику [19] с переводом авторов)

Fig. 4. Control and telemetry system of IBED drill operating parameters
(according to source [19] with authors' translation)

образовательное устройство, установленное внутри снаряда и распределяющее питание на датчики и контрольно-измерительные устройства. Выходные аналоговые сигналы с измерительных устройств передавались с помощью модуля передачи данных ADAM Module-4117, установленного внутри снаряда, по двум информационным проводным жилам на поверхность.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов выполненного обзора позволил сформулировать следующие выводы:

1. Системы контроля и телеметрии режимных параметров бурения обладают таким свойством, как селективность, то есть каждый из компьютеров отвечает за управление отдельно назначенным для него узлом бурового комплекса (лебедки, бурового снаряда). При этом выводимая на экраны информация сгруппирована по функционально-технологическому признаку (на первом мониторе – по лебедке, на втором – по бурению, на третьем – по скважинной геофизике).

2. Возможность осуществления записи в реальном времени и хранение данных на индивидуальном накопителе позволяют провести анализ предыдущих буровых рейсов и надлежащим образом подготовить буровой снаряд к дальнейшим работам на последующих интервалах скважины.

3. Наличие оптоволокну в конструкции ГНК обеспечивает высокоскоростную передачу данных от измерительных и преобразующих сигнал устройств (датчики и аналого-цифровые преобразователи), установленных внутри бурового снаряда, на поверхность, обеспечивая оперативное управление процессом бурения и вспомогательными операциями.

4. С учетом значительной протяженности грузонесущего кабеля (более 3 км) необходимо использовать параллельное соединение токоведущих жил малого поперечного сечения для снижения потерь напряжения на обмотках ПЭД бурового снаряда.

5. Применение бесконтактных датчиков обеспечивает надежность работы системы контроля и телеметрии и упрощает исполнение бурового снаряда.



6. Обязательными контролируемыми величинами во время бурения являются: токовая нагрузка ПЭД БК; осевая – на забой скважины (косвенно регулируемая через величину скорости подачи бурового снаряда на забой скважины); величина проворота бурового снаряда.

7. В технологии колонкового бурения скважин в ледниках и ПГП электромеханическими снарядами на ГНК система контроля и телеметрии представляет собой электротехнический комплекс, который можно представить в виде функциональной блок-схемы, изображенной на рис. 5. Он состоит из поверхностного оборудования для контроля спуско-подъемных операций и процесса бурения и находящихся в буровом снаряде датчиков с преобразователями сигналов. К поверхностному оборудованию электротехнического комплекса относит-

ся аппаратный блок, состоящий из нескольких компьютеров с мониторами с установленным программным обеспечением, с помощью которого выполняются сбор информации, поступающей с датчиков, обработка и последующий вывод ее на экраны мониторов в режиме реального времени в виде графиков или действующих значений на цифровом табло.

8. Контрольно-измерительное оборудование электротехнического комплекса, как правило, представлено аналоговыми и цифровыми приборами измерения, при этом элементы контрольно-измерительной аппаратуры находятся как на поверхности (в помещении бурового комплекса), так и внутри конструкции бурового снаряда.

Представленная на рис. 5 блок-схема описывает общие моменты рассмотренных систем и может быть использована в качестве

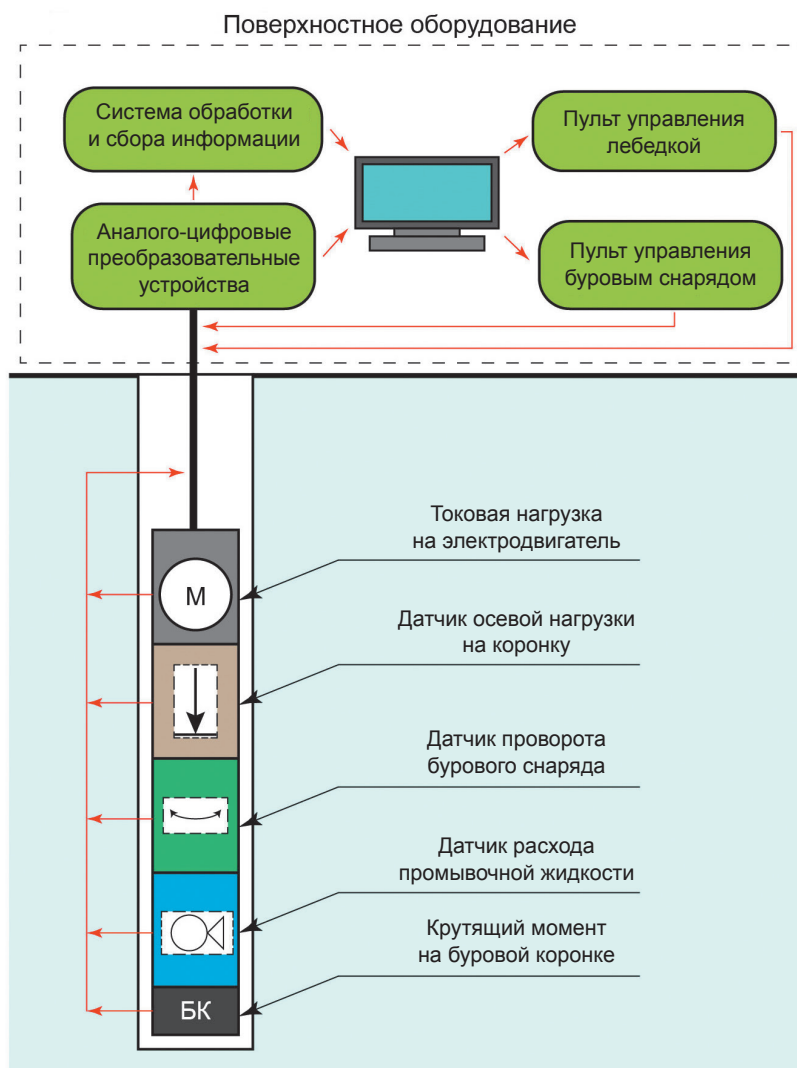


Рис. 5. Функциональная блок-схема системы контроля и телеметрии режимных параметров колонкового бурения снарядами на грузонесущем кабеле:
М – электрическая машина переменного тока (электродвигатель); БК – буровая коронка

Fig. 5. Schematic diagram of the control and telemetry system of operating parameters of core drilling with cable-suspended drills:

М – AC electric motor; БК – drill bit



основы для разработки системы контроля и телеметрии процесса колонкового бурения электромеханическим снарядом на ГНК, реализующим возвратно-вращательный способ разрушения горной породы.

На основании результатов анализа проведенного обзора были сформулированы следующие рекомендации:

- система должна обладать селективностью, быстродействием, информативностью, возможностью записи в реальном времени и хранения данных бурового рейса, отражающих процесс бурения в полной мере;

- для обеспечения высокоскоростной передачи данных необходимо использовать оптоволокно в конструкции грузонесущего кабеля;

- следует применять в конструкции бурового снаряда электронные устройства и компоненты, обеспечивающие бесконтактную передачу информационных сигналов на жилы ГНК для повышения надежности и бесперебойности системы контроля и телеметрии;

- необходимо использовать в конструкции бурового снаряда датчик определения угла

поворота и частоты изменения направления вращения (до 50 Гц) буровой коронки;

- необходимо использовать в конструкции бурового снаряда тензометрический датчик контроля осевой нагрузки на забой скважины;

- необходимо применение трехосевого датчика определения положения бурового снаряда в скважине.

Заключение

Таким образом, быстродействующая и надежная система контроля и телеметрии является одним из главных условий успешного проведения буровых работ. Проектирование данного рода систем требует четкого технического задания для их разработки и применения современных решений из области электроники, автоматики и электротехники. На основе проведенного исследования с учетом анализа результатов выполненного обзора были сформулированы рекомендации к разрабатываемой системе контроля и телеметрии применительно к возвратно-вращательному способу бурения ПГП. Данный способ планируется применить при колонковом бурении ПГП в Антарктиде.

Список источников

1. Михальский Е.В., Каменев Е.Н., Михальская А.С. Геологическое изучение Антарктиды: исторические аспекты и современное состояние // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2. С. 97–112. EDN: NYHDPH.
2. Wu G., Ferraccioli F., Zhou W., Yuan Y., Gao J., Tian G. Tectonic implications for the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica, from airborne gravity and magnetic data // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 306. <https://doi.org/10.3390/rs15020306>.
3. Шадрин В.С., Климов В.Я., Большунов А.В. Современное состояние технологий колонкового бурения подледниковых горных пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 342–355. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355>. EDN: NDJVMD.
4. Литвиненко В.С. Уникальные техника и технология бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5–10. EDN: TGNKOH.
5. Litvinenko V. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Antarctic natural resource development // Chemie Der Erde – Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125652. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>.
6. Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н., Игнатьев С.А., Кадочников В.Г., Крикун Н.С. [и др.]. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724–741. EDN: WQNJET.
7. Игнатьев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В., Васильева М.А., Ожигин А.Ю. Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 141–152. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010076>. EDN: MABFEO.
8. Сербин Д.В., Дмитриев А.Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833–842. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82>. EDN: PLQDJW.
9. Сербин Д.В., Кадочников В.Г., Большунов А.В., Дмитриев А.Н., Горелик В.Г. Экспериментальные исследования процесса образования призабойной кольцевой циркуляции теплоносителя // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2024. № 1. С. 16–22. EDN: XZVQNT.
10. Шишкин Е.В., Большунов А.В., Тимофеев И.П., Авдеев А.М., Ракитин И.В. Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 853–864. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53>. EDN: UMLVXQ.
11. Васильев Н.И., Лейченко Г.Л., Загивный Э.А. Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 199–208. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>. EDN: YLMZAH.



12. Загрянный Э.А., Поддубный Д.А. Динамически уравновешенный буровой снаряд на грузонесущем кабеле для взятия донных отложений подледниковых озер в Антарктиде // Проблема механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2018 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. Т. 1. С. 197–201. EDN: YQRMJN.
13. Shturmakov A.J., Lebar D.A., Mason W.P., Bentley C.R. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 1. Design concepts // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 28–34. <https://doi.org/10.3189/172756407786857811>.
14. Mason W.P., Shturmakov A.J., Johnson J.A., Haman S. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 2. Mechanicak design // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 35–40. <https://doi.org/10.3189/172756407786857640>.
15. Mortensen N.B., Sendelbach P.J., Shturmakov A.J. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 3. Control, electrical and electronics design // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 41–50. <https://doi.org/10.3189/172756407786857668>.
16. Shturmakov A.J., Sendelbach P.J. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 4. Drill cable // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 51–53. <https://doi.org/10.3189/172756407786857802>.
17. Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part I: General concept and drilling shelter structure // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>.
18. Talalay P., Li X., Zhang N., Fan X., Sun Y., Cao P., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part II: Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED) // *Annals of Glaciology*. 2021. Vol. 62. Iss. 84. P. 12–22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>.
19. Zhang N., Talalay P., Liu J., Fan X., Kong Q., Yu H., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part IV: Electrical and electronic control system // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 34–45. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>.
20. Fan X., Talalay P., Sun Yo., Li X., Zhang N., Markov A., et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part III. Drilling auxiliaries and environment measures // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 24–33. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.39>.

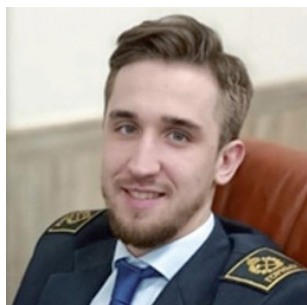
References

1. Mihal'skij E.V., Kamenev E.N., Mihal'skaya A.S. Geological study of Antarctica: historical aspects and current state. *Arctic and Antarctic Research*. 2011;2:97-112. (In Russ.). EDN: NYHDPH.
2. Wu G., Ferraccioli F., Zhou W., Yuan Y., Gao J., Tian G. Tectonic implications for the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica, from airborne gravity and magnetic data. *Remote Sensing*. 2023;15(2):306. <https://doi.org/10.3390/rs15020306>.
3. Shadrin V.S., Klimov V.Ya., Bolshunov A.V. Current state of subglacial rock core drilling technologies. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):342-355. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355>. EDN: NDJVM.
4. Litvinenko V.S. Unique equipment and technology of drilling wells in Antarctic ice. *Journal of Mining Institute*. 2014;210:5-10. (In Russ.). EDN: TGNKOH.
5. Litvinenko V. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Antarctic natural resource development. *Chemie Der Erde – Geochemistry*. 2020;80(3):125652. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>.
6. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Dmitriev A.N., Ignatev S.A., Kadochnikov V.G., Krikun N.S., et al. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:724-741. (In Russ.). EDN: WQNJET.
7. Ignatiev S.A., Vasilev D.A., Bolshunov A.V., Vasileva M.A., Ozhigin A.Yu. Experimental research of ice cuttings transport by air while drilling of the snow-firn layer. *Ice and Snow*. 2023;63(1):141-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673423010076>. EDN: MABFEO.
8. Serbin D.V., Dmitriev A.N. Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:833-842. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82>. EDN: PLQDJW.
9. Serbin D.V., Bolshunov A.V., Dmitriev A.N., Kadochnikov V.G., Gorelikov V.G. Experimental studies of the process of bottomhole annular coolant circulation formation. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2024;1:16-22. (In Russ.). EDN: XZVQNT.
10. Shishkin E.V., Bolshunov A.V., Timofeev I.P., Avdeev A.M., Rakitin I.V. Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial Lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:853-864. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53>. EDN: UMLVXQ.
11. Vasilev N.I., Lejchenkov G.L., Zagrivny E.A. Prospects of obtaining samples of bottom sediments from subglacial Lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2017;224:199-208. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>. EDN: YLMZAH.
12. Zagrivny E.A., Poddubny D.A. Dynamically balanced drilling machine for a load-carrying cable for taking bottom sediments of subglacial lakes in Antarctica. In: *Problema mekhaniki sovremennykh mashin: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. = Issues on modern Machines Mechanics: Proceedings of the VII International scientific Conference*. 25–30 June 2018, Ulan-Ude. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management; 2018, vol. 1, p. 197-201. (In Russ.). EDN: YQRMJN.
13. Shturmakov A.J., Lebar D.A., Mason W.P., Bentley C.R. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 1. Design concepts. *Annals of Glaciology*. 2007;47:28-34. <https://doi.org/10.3189/172756407786857811>.
14. Mason W.P., Shturmakov A.J., Johnson J.A., Haman S. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 2. Mechanical design. *Annals of Glaciology*. 2007;47:35-40. <https://doi.org/10.3189/172756407786857640>.
15. Mortensen N.B., Sendelbach P.J., Shturmakov A.J. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 3. Control, electrical and electronics design. *Annals of Glaciology*. 2007;47:41-50. <https://doi.org/10.3189/172756407786857668>.



16. Shturmakov A.J., Sendelbach P.J. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 4. Drill cable. *Annals of Glaciology*. 2007;47:51-53. <https://doi.org/10.3189/172756407786857802>.
17. Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part I: General concept and drilling shelter structure. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):1-11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>.
18. Talalay P., Li X., Zhang N., Fan X., Sun Y., Cao P., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part II: Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED). *Annals of Glaciology*. 2021;62(84):12-22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>.
19. Zhang N., Talalay P., Liu J., Fan X., Kong Q., Yu H., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part IV: Electrical and electronic control system. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):34-45. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>.
20. Fan X., Talalay P., Sun Yo., Li X., Zhang N., Markov A., et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part III. Drilling auxiliaries and environment measures. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):24-33. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.39>.

Информация об авторе / Information about the author



Шадрин Вячеслав Сергеевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
✉ Shadrin_VS@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2329-3435>

Vyacheslav S. Shadrin,

Postgraduate Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
✉ Shadrin_VS@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2329-3435>



Большунов Алексей Викторович,

кандидат технических наук, доцент,
руководитель лаборатории технологии
и техники бурения скважин в условиях станции Восток,
научный центр «Арктика»,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Bolshunov_AV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3879-7380>

Alexey V. Bolshunov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Laboratory of Technology
and Drilling Equipment in Vostok Station Conditions,
Arktika Research Center,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
Bolshunov_AV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3879-7380>



Климов Владимир Яковлевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры практических навыков и опыта,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Klimov_VYa@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9023-9397>

Vladimir Ya. Klimov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Practical
Skills and Experience,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
Klimov_VYa@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9023-9397>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

В.С. Шадрин – разработка концепции, разработка методологии, проведение исследования.
А.В. Большунов – научное руководство, написание рукописи – рецензирование и редактирование.
В.Я. Климов – разработка методологии, написание рукописи – рецензирование и редактирование.
Vyacheslav S. Shadrin – conceptualization, methodology, investigation.
Alexey V. Bolshunov – supervision, writing – review & editing.
Vladimir Ya. Klimov – methodology, writing – review & editing.

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 01.11.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 01.11.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 504.064

EDN: OEXJEG

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-453-467



Первые результаты переоценки состояния окружающей среды в зоне влияния бывшего мышьякового завода в поселке городского типа Вершино-Дарасунский (Забайкальский край)

О.Л. Качор^{a✉}, З.Л. Икрамов^b, А.В. Паршин^c

^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^cИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме. Целью проведенного исследования являлось изучение геоэкологической обстановки в поселке городского типа Вершино-Дарасунский (Забайкальский край, Россия), где с 1930-х гг. до 1973 г. функционировал завод по производству белого мышьяка для изготовления боевых отравляющих веществ. После его закрытия рекультивация территории не проводилась, что представляет серьезную экологическую угрозу, которая на протяжении десятков лет не устраняется в связи с низким приоритетом данной территории в реестре объектов накопленного вреда окружающей среде. По мнению авторов, текущая оценка объекта, базирующаяся на данных о незначительном по площади участке в контурах бывшей промплощадки завода, является критически заниженной и представляет собой основную причину неуспешности ряда попыток запуска разработки проекта по ликвидации данного участка, которые на протяжении многих лет предпринимают уполномоченные органы власти. Проведенное исследование является показательным кейсом из реальной российской экологической практики и может представлять интерес для академического и профессионального сообществ. В ходе работы были проанализированы актуальная нормативная база по оценке и ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде и принятая методология этой оценки, проведен комплекс полевых и лабораторных исследований на площади 16,5 км², отобрано более 150 проб почвы. В статье представлены первые результаты геохимических исследований почв, согласно которым источником негативного воздействия на объекты окружающей среды является уже не только сама загрязненная промплощадка, но и вся изученная территория, которая за многие десятилетия изменила свои физико-химические параметры. Обнаружены аномалии мышьяка и тяжелых металлов, превышающие предельно допустимые и ориентировочно допустимые концентрации в сотни и тысячи раз, причем они локализованы не только в районе известного объекта накопленного вреда окружающей среде, но и еще в нескольких местах без очевидных на данный момент источников техногенных воздействий. Полученные результаты позволили заявить о необходимости расширения зоны рекультивационных работ за пределы непосредственной территории бывшего завода. В соответствии с принятыми критериями произведен перерасчет показателя экологической опасности и обоснована необходимость изменения приоритизации рекультивации данного объекта. Также, согласно существующей нормативной базе, даны рекомендации по дальнейшей оценке воздействия объектов накопленного вреда окружающей среде на жизнь и здоровье граждан.

Ключевые слова: мышьяк, объекты накопленного вреда окружающей среде, экологический мониторинг, загрязнение, тяжелые металлы, почва, техногенное воздействие, рекультивация

Финансирование: Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030» в рамках реализации стратегического проекта Иркутского национального исследовательского технического университета i.GeoDesign.

Для цитирования: Качор О.Л., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Первые результаты переоценки состояния окружающей среды в зоне влияния бывшего мышьякового завода в поселке городского типа Вершино-Дарасунский (Забайкальский край) // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 453–467. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-453-467>. EDN: OEXJEG.



GEOECOLOGY

Original article

First reassessment results of environment state in former arsenic plant impact zone in Vershino-Darasunsky settlement (Transbaikal region)

Olga L. Kachor^a, Ziyoviddin L. Ikramov^b, Alexander V. Parshin^c

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

^cA.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the research is to study the geoecological situation in the urban-type settlement of Vershino-Darasunsky (Transbaikal region, Russia), where a plant producing white arsenic for chemical warfare agents operated from the 1930s until 1973. Reclamation did not follow the shutdown of the plant, which causes a serious environmental threat not eliminated with past decades due to the low priority of this territory in the register of objects of accumulated environmental damage. The authors consider the current facility assessment, which is based on data on the insignificant area in the boundaries of the former industrial site of the plant, to be critically underestimated. The latter is the main reason for the failure of a number of attempts made by executive authorities for years to launch the development of this site reclamation project. The conducted research is an illustrative case study from real Russian environmental practice and may be of interest to academic and professional communities. The study includes the analysis of the relevant regulatory framework for the assessment and elimination of the objects of accumulated environmental damage as well as the adopted methodology to carry out the assessment. A complex of field and laboratory studies was conducted on the area of 16.5 km², more than 150 soil samples were taken. The article presents the first results of geochemical soil studies, according to which it is not only contaminated industrial site, but also the entire studied territory, which has changed its physico-chemical parameters over many decades are the sources of negative impact on environmental objects. Anomalies of arsenic and heavy metals exceeding the maximum permissible and approximate permissible concentrations by hundreds and thousands of times have been detected, and they are localized not only in the area of the known facility of accumulated environmental damage, but also in several other places without currently visible sources of man-made impacts. The results obtained made it possible to declare the need to expand the reclamation area beyond the immediate territory of the former plant. In accordance with the accepted criteria, the environmental hazard indicator has been recalculated and the need to change the reclamation prioritization of this facility has been justified. Moreover, based on the existing regulatory framework, recommendations are given for further assessment of the impact of objects of accumulated environmental damage on the lives and health of citizens.

Keywords: arsenic, objects of accumulated environmental damage, environmental monitoring, contamination, heavy metals, soil, technogenic impact, reclamation

Funding: The work was carried out with the support of the Priority 2030 Federal State Program as a part of the Irkutsk National Research Technical University strategic project i.GeoDesign.

For citation: Kachor O.L., Ikramov Z.L., Parshin A.V. First reassessment results of environment state in former arsenic plant impact zone in Vershino-Darasunsky settlement (Transbaikal region). *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):453-467. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-453-467>. EDN: OEXJEG.

Введение

Экологическое благополучие населения Российской Федерации является одним из приоритетов государственной политики, гарантируется Конституцией РФ, отражено в Федеральном законе «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ от 10 января 2002 г.¹, является одной из национальных целей развития страны на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г. (согласно Указу Президен-

та «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» № 309 от 7 мая 2024 г.²). Одной из угроз экологическому благополучию населения являются объекты накопленного вреда окружающей среде (ОНВРС), значительная часть которых представляет собой заброшенные промплощадки закрытых советских предприятий, не имеющих действующего владельца

¹ Об охране окружающей среды: федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Consultant.ru. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=m6r7foam27754083617 (дата обращения: 25.11.2024).

² О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 // Garant.ru. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408892634/?ysclid=m6r8eug54i328984430> (дата обращения: 25.11.2024).



и перешедших в качестве пассива на баланс местных администраций. Выявление, оценка и ликвидация ОНВОС – несомненные условия для улучшения качества окружающей среды и, как следствие, экологического благополучия граждан. По данным на 26 ноября 2024 г., в государственном реестре объектов накопленного вреда окружающей среде (ГРОНВОС) присутствует 1068 объектов, небольшая часть из которых уже рекультивирована или находится на стадии рекультивации³.

В настоящее время продолжает реализовываться федеральный проект «Генеральная уборка», главной целью которого является решение проблемы ликвидации ОНВОС на всей территории России [1]. Посредством данного проекта осуществляется государственная поддержка субъектов РФ в виде софинансирования из федерального бюджета работ по ликвидации опасных с экологической точки зрения объектов. Выявление, обследование, оценка, ведение государственного реестра ОНВОС и их ликвидация строго регламентированы нормативными правовыми актами, способствующими унификации всех действий в целях улучшения качества, сроков и результатов работ по решению масштабной для страны проблемы накопленного экологического вреда. Тем не менее, понимая масштабы и сложность поставленной задачи, безусловно, следует рассчитывать на значительное количество случаев неверного категорирования объекта или отсутствия его в реестре [2]. Инициативные геоэкологические исследования, в том числе с привлечением значительного количества студентов, являются одним из рабочих механизмов обнаружения и изучения ОНВОС, позволяющим оптимизировать бюджеты администраций и ведомственных учреждений различного уровня и подчиненности и способствовать получению достоверной информации о качестве окружающей среды, на основе которой уполномоченные органы смогут ответственно и обоснованно запустить существующие процедуры рекультивации объектов. Предметом изучения в проведенной нами работе являлся показательный кейс, а именно результаты исследований по переоценке ОНВОС, который на протяжении многих лет не был рекультивирован – в пер-

вую очередь из-за недостаточности сведений, учтенных в ГРОНВОС. В качестве объекта выступила промплощадка бывшего мышьяковского завода в поселке городского типа Вершино-Дарасунский Забайкальского края, обратившая на себя внимание слишком малой учтенной площадью (0,3 га). Вследствие этого фактора, в значительной степени определяющего низкую категорию приоритета объекта и выделение небольшого количества средств на проведение обследования, на протяжении десятков лет все конкурсные процедуры, которые добросовестно инициировали сотрудники уполномоченных органов и местной администрации, завершались без определения подрядчика, готового выполнить работы. Так как степень воздействия на окружающую среду аналогичных объектов не может ограничиваться контурами промплощадки, выполнение работ в рамках технического задания однозначно привело бы к быстрому вторичному загрязнению участка и штрафам для организации-исполнителя. После того как подобный конкурс, проводившийся в 2024 г., завершился без выхода на торги хотя бы одного потенциального подрядчика, были инициированы эколого-геохимические исследования, результаты которых станут подтверждением гипотезы о недооценке объекта и позволят повысить его категорию в ГРОНВОС в соответствии с существующей нормативной базой.

Материалы и методы исследования

С учетом поставленной цели – оптимизации процессов изучения и рекультивации ОНВОС – в первую очередь была рассмотрена существующая в России нормативно-методическая база по ликвидации ОНВОС. Она начала формироваться в 2017 г. с внесением в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ¹ статей 80.1–80.3, после чего последовала череда нормативных правовых документов, послуживших началом целому комплексу масштабных мероприятий по выявлению, оценке и ликвидации ОНВОС по всей территории Российской Федерации [3–7].

В соответствии с Постановлением Правительства РФ «Об утверждении Правил выявления объектов накопленного вреда окружа-

³ Ликвидация накопленного вреда окружающей среде // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации // Mnr.gov.ru. Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/likvidatsiya_nakoplennoego_vreda_okruzhayushchey_srede/ (дата обращения: 26.11.2024).



ющей среде» № 2239 от 21 декабря 2023 г.⁴ выявление ОНВОС применительно к территориям, расположенным в границах земельных участков, находящихся в собственности муниципальных образований, осуществляется органами местного самоуправления таких муниципальных образований, применительно к иным территориям – органами государственной власти субъектов РФ. Для включения в ГРОНВОС заявителем (органы государственной власти РФ, органы государственной власти субъектов РФ или органы местного самоуправления) подается заявление в Министерство природных ресурсов и экологии РФ с прилагаемыми к нему результатами инвентаризации объекта.

Согласно статье 80.1 Федерального закона «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ¹, при выявлении ОНВОС определяются:

- место нахождения объекта накопленного вреда окружающей среде;
- площадь территорий, на которых выявлен накопленный вред окружающей среде, целевое назначение земель и (или) земельных участков;
- вид хозяйственной и (или) иной деятельности, в результате осуществления которой возник накопленный вред окружающей среде;
- наличие объектов капитального строительства и (или) отходов производства и потребления на территориях, которые могут быть признаны объектами накопленного вреда окружающей среде;
- компоненты природной среды, на которые может быть оказано негативное воздействие объекта накопленного вреда окружающей среде;
- количество населения, проживающего на территории, окружающая среда на которой может быть подвержена негативному воздействию объекта накопленного вреда окружающей среде.

Порядок обследования и оценки ОНВОС утвержден Постановлением Правительства РФ

«Об утверждении Правил обследования и оценки объектов накопленного вреда окружающей среде» № 1967 от 23 ноября 2023 г.⁵ Данные мероприятия (за исключением оценки воздействия объекта накопленного вреда на жизнь и здоровье граждан) проводит Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор), являясь участником федерального проекта «Генеральная уборка». То есть с 2024 г. после выявления объекта накопленного вреда муниципалитет передает информацию в Росприроднадзор, специалисты которого в ходе осуществления оценки устанавливают: массу загрязнителей, объем отходов и их класс опасности; площадь водных и земельных участков под объектом накопленного вреда, категорию земли; количество человек, проживающих в зоне потенциального влияния ОНВОС; степень отрицательного воздействия ОНВОС на окружающую среду; вероятность появления рисков, связанных с миграцией загрязнителей в компоненты природной среды; наличие опасных веществ, перечисленных в международных соглашениях.

Согласно распоряжению Росприроднадзора № 28-р от 1 июля 2024 г.⁶, утвержден график обследования и оценки ОНВОС на текущий год. Так, на 2025 г. он содержит 250 ОНВОС, в отношении которых специалистами ведомства будут проведены обследование и оценка состояния окружающей среды.

На последнем этапе, имея на руках результаты инвентаризации объекта (материалы о его выявлении, обследовании и оценке), орган государственной власти РФ, орган государственной власти субъекта РФ или орган местного самоуправления подает заявление о включении объекта в ГРОНВОС в соответствии с Постановлением Правительства РФ «О ведении государственного реестра объектов накопленного вреда окружающей среде» № 2268 от 23 декабря 2023 г.⁷

⁴ Об утверждении Правил выявления объектов накопленного вреда окружающей среде: постановление Правительства РФ № 2239 от 21.12.2023 // Garant.ru. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408165793/?ysclid=m6r8e8ulit296679850> (дата обращения: 25.11.2024).

⁵ Об утверждении Правил обследования и оценки объектов накопленного вреда окружающей среде: постановление Правительства РФ № 1967 от 23.11.2023 // Garant.ru. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407970305/?ysclid=m6r8ol6l1i307968594> (дата обращения: 25.11.2024).

⁶ Распоряжение Росприроднадзора № 28-р от 01.07.2024 // Rpn.gov.ru. Режим доступа: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/d79/p6sjqzdaibbugxf5s5u08be2bgade8e/28_r.pdf (дата обращения: 25.11.2024).

⁷ О ведении государственного реестра объектов накопленного вреда окружающей среде: постановление Правительства РФ № 2268 от 23.12.2023 // Garant.ru. Режим доступа: <https://base.garant.ru/408283005/?ysclid=m6r93dl1ip721926386> (дата обращения: 25.11.2024).



С 15 марта 2024 г. в России действуют обновленные правила ведения ГРОНВОС с установленными критериями определения объектов, накопленный вред окружающей среде на которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке, каждый из них имеет свое числовое значение. Сумма значений каждого критерия и определяет порядок ликвидации объекта: чем выше значение суммы критериев, тем опаснее объект для окружающей среды и тем скорее его необходимо устранить. Указанные

критерии и диапазоны их возможных значений представлены в таблице.

До вступления в силу Постановления Правительства РФ «Об утверждении Правил обследования и оценки объектов накопленного вреда окружающей среде» № 1967 от 23 ноября 2023 г.⁵ выявление ОНВОС, их обследование и оценка осуществлялись целиком органами местного самоуправления муниципальных образований и органами государственной власти субъектов РФ – для территорий, не относя-

Критерии определения объектов, накопленный вред окружающей среде на которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке
Criteria for determining objects whose accumulated environmental damage is subject to reclamation on a priority basis

Номер критерия	Суть критерия	Диапазон или варианты значений критерия
1	Масса или объем размещенных отходов производства и потребления конкретного класса опасности	0–0,75
2	Площадь территории (акватории), подверженной негативному воздействию (на которой расположен объект накопленного вреда окружающей среде)	0–0,75
3	Уровень и объем негативного воздействия на окружающую среду (превышение установленных значений нормативов качества окружающей среды)	0,15–0,75
4	Наличие на объекте накопленного вреда окружающей среде опасных, в том числе радиоактивных, высокотоксичных, обладающих канцерогенными, мутагенными свойствами веществ (веществ I и II классов опасности), концентрация которых превышает установленные нормативы качества и (или) санитарно-гигиенические нормативы, включая предельно допустимые концентрации химических веществ в водах водных объектов, атмосферном воздухе и почве	0/0,1
5	Расположение объекта накопленного вреда окружающей среде в границах населенного пункта, имеющего статус города	0/1
6	Количество населения, проживающего на территории, окружающая среда на которой может быть подвержена негативному воздействию объекта накопленного вреда окружающей среде	0–1
7	Расположение объекта накопленного вреда окружающей среде в Арктической зоне Российской Федерации	0/0,5
8	Категория риска вредного воздействия объекта накопленного вреда окружающей среде на жизнь и здоровье граждан	0–3
9	Расположение объекта накопленного вреда окружающей среде на землях особо охраняемых природных территорий, в охранный зоне особо охраняемой природной территории, в округе санитарной охраны лечебно-оздоровительных местностей, курортов и природных лечебных ресурсов	0/0,5
10	Расположение объекта накопленного вреда окружающей среде на Байкальской природной территории	0/0,5
11	Расположение объекта накопленного вреда окружающей среде в водоохранной зоне водного объекта, прибрежной защитной полосе, зоне санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, рыбохозяйственной заповедной зоне	0/0,5
12	Расположение объекта накопленного вреда окружающей среде, на котором размещены твердые коммунальные отходы, в границах первой – шестой подзон приаэродромной территории	0/0,5



щихся к собственности муниципальных образований, посредством различных контрактов, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и пр. Такой подход, зачастую не обеспеченный устойчивым плановым финансированием, не гарантировал самого факта изучения территорий либо мог привести к некорректной оценке степени опасности обследуемого ОНВОС вследствие несоответствия объемов финансирования масштабам решаемой задачи [8]. Как известно, недофинансированность и (или) ограниченность исследований, реализуемых на целевые государственные средства на инженерно-экологические изыскания, строгими нормативными требованиями по предельным видам и объемам работ может привести к занижению масштабов негативного влияния объекта накопленного вреда на весь природно-техногенный комплекс [8–12]. Легко получить неверную оценку при первичном и одностадийном исследовании сложного объекта, когда границы участка воздействия априори неизвестны, особенности распределения и миграции загрязняющих веществ и отклик объектов окружающей среды достоверно не установлены, также крайне важно применять максимально широкий комплекс методов геоисследований для получения полной картины

о состоянии изучаемого объекта [9–14]. Данная ситуация является одним из важнейших факторов, сформировавших недостатки системы категорирования ОНВОС, внесенных в реестр до 2024 г., которым уже присвоено значение критериев.

Поселок городского типа Вершино-Дарасунский Тунгокоченского района, основанный в 1865 г. с момента обнаружения там россыпного золота, является одним из старейших золотодобывающих поселений Забайкалья. Его население на 2018 г., по данным ГРОНВОС, составляло 5478 человек, оно стабильно снижалось и продолжает снижаться в последние полвека. В 1930-х гг. XX в. в поселке был построен один из нескольких в стране заводов по выпуску белого мышьяка на основе добываемой здесь и в восточных границах Забайкалья (поселок Запокровский) арсенопиритной руды для производства боевого отравляющего вещества – люизита. В дальнейшем из-за мирового запрета использования боевых отравляющих веществ и отсутствия необходимости в большом количестве мышьяка в стране завод был закрыт (1973 г.) без ликвидации самой промплощадки (рис. 1).

До настоящего времени на заброшенной промплощадке, соседствующей с действующим



Рис. 1. Общий вид на промплощадку бывшего мышьяковистого завода (2016 г.)
Fig. 1. General view of the industrial site of the former arsenic plant (2016)



щей золотоизвлекательной фабрикой компании Highland Gold, находятся развалины нескольких зданий (основной цех, где ранее происходил обжиг арсенопиритной руды; цех рафинации мышьяка с кулерами и хорошо

различимыми на них следами полупродукта серого оттенка – триоксида мышьяка; вспомогательные корпуса), а также производственные отходы в виде отвалов огарков (рис. 2, 3).



Рис. 2. Вид на промплощадку и здание основного цеха:

а – 2016 г.; б – 2024 г.

Fig. 2. View of the industrial site and the main workshop building:

а – in 2016; б – in 2024



Рис. 3. Цех рафинации мышьяка с кулерами (2016 г.)
Fig. 3. Arsenic refining plant with coolers (2016)

Промплощадка завода представляет собой серьезную угрозу для всех объектов окружающей среды [15] и здоровья местного населения, так как расположена практически в центре поселка вдоль основной транспортной улицы города, не огорожена, знаки химической опасности отсутствуют [16]. Следовательно, происходит перенос загрязняющих веществ ветром и поверхностными водами за пределы промплощадки и включение их в биогеохимические круговороты, из-за чего формируется особый техногенно измененный геохимический фон изучаемой территории. Оценка данного геохимического фона была произведена в рамках проведенной нами работы.

Вопрос ликвидации источника потенциального загрязнения мышьяком на территории поселка Вершино-Дарасунский с 2004 г. по настоящее время поднимался неоднократно. При этом важно отметить, что вошедшему в 2018 г. в ГРОНВОС объекту было присвоено значение общего влияния на состояние экологической безопасности, равное 1,95 (при формировании данной оценки учитывалась площадь всего в 0,3 га).

Последняя попытка разработки проекта рекультивации указанной площади была осуществлена в 2024 г. 24 мая на сайте госзакупок Ми-

нистерство природных ресурсов Забайкальского края в очередной раз объявило аукцион на 20 млн руб. для создания проекта демонтажа двух цехов бывшего мышьякового завода⁸. Согласно техническому заданию, подрядчик должен был разработать проект демонтажа цеха завода и цеха рафинации мышьяка, а также и рекультивации территории с учетом требований, предъявляемых к содержанию мышьяка. Финансирование было запланировано из краевого бюджета, тем не менее, как и во всех предыдущих случаях, конкурс не состоялся, так как на него не поступило ни одной заявки.

Есть основания полагать, что сложившаяся ситуация связана с крайне низким заложенным финансированием столь сложного объекта (местоположение, основное загрязняющее вещество, продолжительность влияния и пр.) и явной недооценкой площади, которую необходимо детально изучить в пределах как непосредственно самой промплощадки, так и близлежащих территорий. Очевидно, что недоизученность прилегающей местности может привести, например, к непрогнозируемому вторичному загрязнению рекультивированной по проекту территории промплощадки, так как за ее пределами содержание мышьяка в почве будет значительно превышать нормативные

⁸ Протокол подведения итогов определения поставщика (подрядчика, исполнителя) № ИЗА1 от 03.07.2024 // Zakupki.gov.ru. Режим доступа: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea20/view/protocol/protocol-docs.html?regNumber=0891200000624006413&protocolId=45592863> (дата обращения: 25.11.2024).



значения, а также к возможному ухудшению состояния здоровья населения поселка и сотрудников золотодобывающей фабрики при разборке зданий, загрязненных мышьяком. Исходя из этого, разработка и реализация проекта рекультивации в текущем варианте технического задания – это не просто бессмысленная трата времени и средств, но и возможность создания серьезных рисков для компании-подрядчика, и поскольку это очевидно, исполнители на данную работу не находятся.

Таким образом, для решения проблемы ликвидации источника экологической опасности в первую очередь необходимо исследовать реальную геоэкологическую ситуацию на всей территории потенциального влияния ОНВОС в поселке Вершино-Дарасунский, а не только в пределах установленных границ объекта. Следует оценить текущее состояние объектов окружающей среды с уточнением в них диапазонов концентраций приоритетных загрязнителей, выявлением основных ореолов аномалий загрязняющих веществ, определением границ распространения многолетнего негативного влияния бывшего мышьяковистого завода. В основе нашей гипотезы ле-

жит предположение, что степень загрязнения всего поселка многократно превышает существующие представления. В таком случае будут получены данные, на основании которых ответственные субъекты государственного управления смогут запланировать масштабные работы на значительной площади и в итоге успешно решить проблему.

В сентябре 2024 г. коллективом института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета были проведены исследования на территории поселка Вершино-Дарасунский площадью 16,5 км² (рис. 4). Перед выездом в среде QGIS/QField был создан проект отбора проб, включающий 152 пробы почвы (в том числе фоновые). Сеть проботбора утверждалась с учетом местоположения источника загрязняющих веществ (в районе промплощадки увеличено количество проб на пробной площадке), а также в соответствии с розой ветров. Поскольку в поселке преобладает западный и северо-западный ветер, частота точек проботбора в восточном и юго-восточном направлениях от источника воздействия также была увеличена. На рис. 4 представлена схема проботбора.

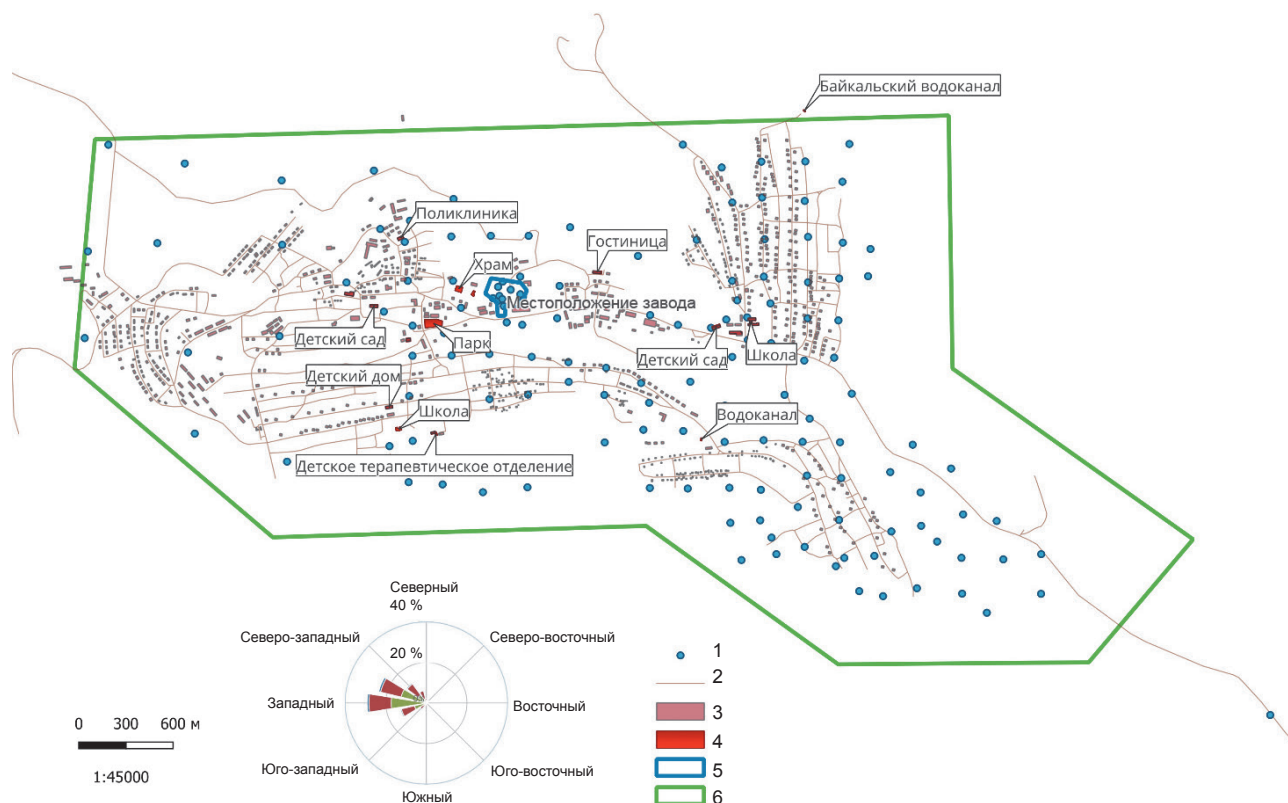


Рис. 4. Схема проботбора почвы в поселке городского типа Вершино-Дарасунский:

1 – точки проботбора; 2 – дороги; 3 – здания; 4 – социально значимые объекты;

5 – граница бывшей промплощадки; 6 – граница исследованного участка

Fig. 4. Soil sampling diagram in Verzhino-Darasunsky settlement:

1 – sampling points; 2 – roads; 3 – buildings; 4 – socially significant facilities;

5 – boundary of the former industrial site; 6 – boundary of the studied area



Отбор проб, который проводился с верхнего горизонта 0–20 см, был осуществлен в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01-2017⁹. Поскольку целью исследования являлось установление концентраций приоритетных загрязняющих веществ (мышьяка и тяжелых металлов), пробы отбирались пластиковыми шпателями. Полученные материалы были доставлены в Иркутск в Химико-аналитическую лабораторию института «Сибирская школа геонаук», где прошли пробоподготовку в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017¹⁰ и были подвергнуты химическому анализу. Аналитические исследования проб на валовое содержание мышьяка, тяжелых металлов и прочих элементов (всего 23 химических элемента) проводились рентгенофлуоресцентным методом анализа с помощью XRF-анализатора SciAps X200 в режиме «Почва» [17–19].

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных химико-аналитических исследований проб почв поселка Вершино-Дарасунский были выявлены значительные превышения предельно допустимых и ориентировочно допустимых концентраций (ПДК/ОДК): в тысячи раз по мышьяку (ОДК 2–10 мг/кг); в сотни раз по никелю (ОДК 20–80 мг/кг) и меди (ОДК 33–132 мг/кг); в десятки раз по свинцу (ОДК 32–130 мг/кг), ртути (ПДК 2,1 мг/кг), цинку (ОДК 55–220 мг/кг), кадмию (ОДК 0,5–2 мг/кг). При этом основное загрязняющее вещество (мышьяк) в соответствии с ГОСТ Р 70281-2022¹¹ относится к первому классу опасности химических веществ, попадающих в почву из выбросов, сбросов, отходов, при избыточном внесении.

На рис. 5 и 6 представлены карты распределения мышьяка и меди, составленные на основании полученных данных о валовых содержаниях загрязняющих веществ в почве на территории поселка Вершино-Дарасунский.

Как видно из рис. 5, по всей территории поселка почва загрязнена мышьяком, то есть

содержание данного элемента повсеместно выше значений допустимого норматива. Наиболее значительная аномалия, связанная с экстремально высокими содержаниями мышьяка (более 1000 мг/кг), наблюдается возле самой промплощадки завода и на близлежащей территории. В указанную зону входят такие социально значимые объекты, как храм, парк, пожарно-спасательная часть. Вторая значительная мышьяковистая аномалия расположена на юго-востоке на выезде из поселка (на удалении от основной автодороги и видимых источников загрязнения). Точные причины ее возникновения на данном этапе установить не удалось – для этого требуются дополнительные исследования.

Загрязнение медью имеет не такой повсеместный характер, на большей части территории превышение незначительное (до 1,5 ОДК) или вообще отсутствует (см. рис. 6). Две из выявленных аномалий соответствуют аномалиям мышьяка (см. рис. 5), тем не менее зона максимальной концентрации первой аномалии сдвинута от промплощадки в юго-восточном направлении, причину этого предстоит установить на следующих этапах изучения геоэкологической ситуации в поселке Вершино-Дарасунский.

На основании первых полученных данных уже можно сделать вывод о необходимости внесения изменений в ГРОНВОС. Так, в данном случае критерий 2 (площадь территории, подверженной негативному воздействию) составляет 16,5 км², что соответствует значению 0,75 (см. таблицу). Критерий 3 (превышение норматива больше 50 ПДК/ОДК) – 0,75. Значение критерия 4 (наличие веществ первого класса опасности) равно 0,1. Наличие населения, подверженного негативному воздействию (критерий 6), формирует коэффициент 0,6. Значение общего влияния на состояние экологической безопасности на основании уже первых данных не может быть меньше 2,2 (при текущей оценке 1,95), при этом в нем пока еще не учтены масса отходов определен-

⁹ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб // Tunadzor.ru. Режим доступа: http://tunadzor.ru/upload/doc/departments/298/gost_17.4.3.01-2017.pdf (дата обращения: 25.11.2024).

¹⁰ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа // Tunadzor.ru. Режим доступа: http://tunadzor.ru/upload/doc/departments/277/m_gost_17.4.4.02-2017.pdf (дата обращения: 25.11.2024).

¹¹ ГОСТ Р 70281-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения // Docs.cntd.ru. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200193598> (дата обращения: 25.11.2024).

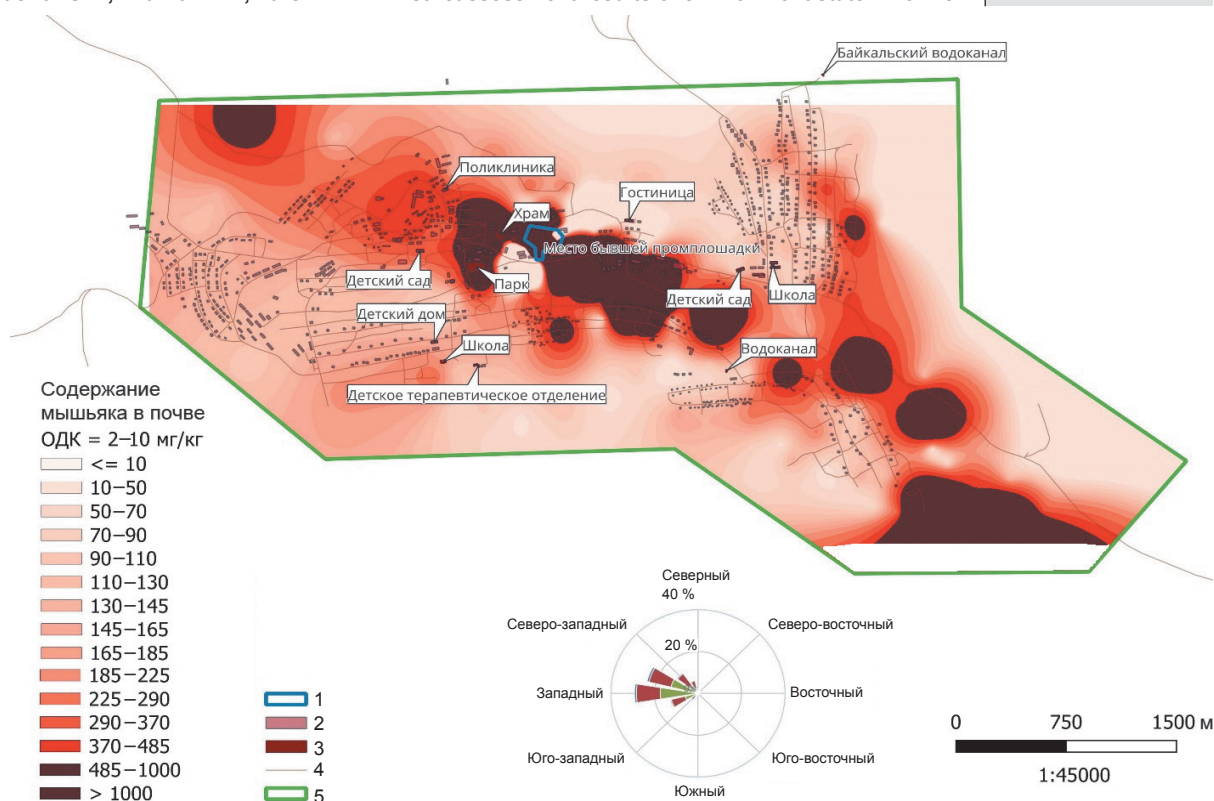


Рис. 5. Карта распределения содержания мышьяка в почве поселка городского типа Вершино-Дарасунский:

1 – граница бывшей промплощадки; 2 – здания;

3 – социально значимые объекты; 4 – дороги; 5 – граница исследованного участка

Fig. 5. Map of arsenic content distribution in Vershino-Darasunsky settlement soil:

1 – boundary of the former industrial site; 2 – buildings;

3 – socially significant facilities; 4 – roads; 5 – boundary of the studied area

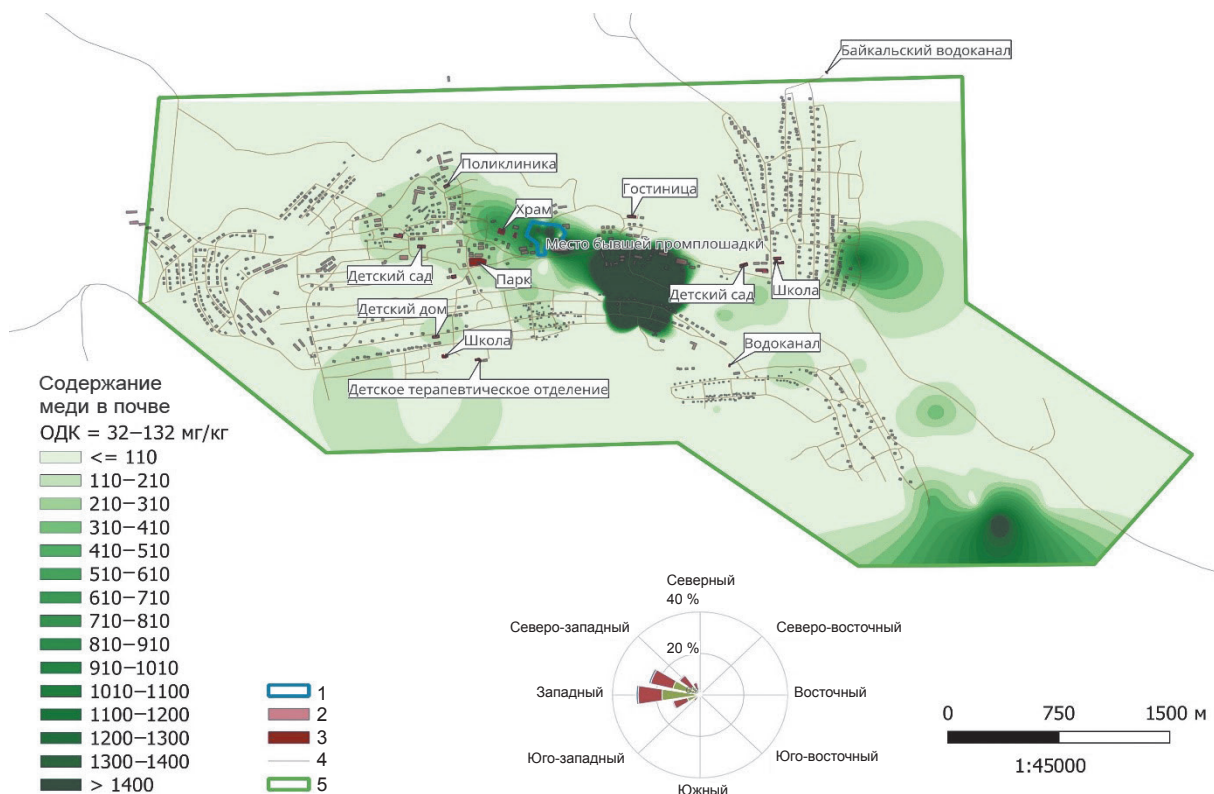


Рис. 6. Карта распределения содержания меди в почве поселка городского типа Вершино-Дарасунский:

1 – граница бывшей промплощадки; 2 – здания;

3 – социально значимые объекты; 4 – дороги; 5 – граница исследованного участка

Fig. 6. Map of copper content distribution in Vershino-Darasunsky settlement soil:

1 – boundary of the former industrial site; 2 – buildings;

3 – socially significant facilities; 4 – roads; 5 – boundary of the studied area



ного класса опасности (не менее 0,3, вероятно 0,45) и оценка риска здоровью населения (при наличии даже умеренного риска принимает значение, соответствующее 1 (как минимум), учитывая, что в пределах значительных аномалий загрязнения расположены социально значимые и жилые объекты). Таким образом, итоговое значение общего влияния на состояние экологической безопасности, вероятно, уже находится на уровне не ниже 3,5, то есть сопоставимо с такими известными объектами НВОС федерального значения, как, например, промплощадка «Усольехимпрома» в г. Усолье-Сибирском Иркутской области, находящаяся в фокусе внимания как местных администраций, так и федеральной власти.

Заключение

В ходе проведенного исследования геоэкологического состояния района поселка городского типа Вершино-Дарасунский установлено загрязнение мышьяком и тяжелыми металлами на площади, составляющей по крайней мере 16,5 км², что в тысячи раз превышает площадь самой промплощадки бывшего мышьяковистого завода и значительно превосходит возможные расчетные прогнозы [20]. При этом учтенный на данный момент в ГРОНВОС объект накопленного экологического вреда имеет площадь всего 0,3 га. Таким образом, источником негативного воздействия на объекты окружающей среды является уже не только сама загрязненная промплощадка, но и вся территория, которая за многие десятилетия изменила свои физико-химические параметры.

Обнаруженные аномалии мышьяка, меди и других загрязняющих веществ, превышающие ПДК/ОДК в сотни и тысячи раз, локализованы не только в районе известного объекта НВОС, но и еще в нескольких местах без оче-

видных источников техногенных воздействий. Установить причины возникновения данных аномалий предполагается на следующих этапах исследования. Полученные в ходе проведенной работы результаты обосновывают необходимость расширения зоны рекультивационных работ за пределы непосредственной территории бывшего завода.

Полученные на текущем (раннем) этапе исследования данные убедительно доказывают необходимость переоценки территории изученного объекта в ГРОНВОС и, как следствие, изменение приоритизации его рекультивации. Таким образом, муниципальной и (или) областной администрации следует обратиться в Росприроднадзор для включения данного объекта в план-график обследования и оценки ОНВОС на 2026 г., а также в Роспотребнадзор для осуществления оценки его воздействия на жизнь и здоровье граждан.

Осуществление подобных проведенному исследований требует не столько значительных финансовых затрат, сколько квалифицированных кадровых ресурсов (в данном случае к ним относятся и студенты) и необходимой лабораторной базы, имеющейся в любом университете, который реализует образовательные программы в областях наук о Земле или окружающей среде. В связи с этим авторы видят значительный потенциал в развитии постоянных прикладных студенческих исследований как основы повышения экологического благополучия населения нашей страны и способа оптимизации бюджетов местных и краевых администраций, которые на основании подобных материалов могут с полной ответственностью инициировать существующую с 2024 г. процедуру кондиционной переоценки и рекультивации ОНВОС, расположенных в пределах территорий их ответственности.

Список источников

1. Алыкова О.И., Арнаут Ю.И., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде в рамках федерального проекта «Генеральная уборка» // Астраханский вестник экологического образования. 2023. № 4. С. 51–58. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-4-51-58>. EDN: TRXXCK.
2. Алыкова О.И., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Накопленный экологический вред: проблемы и последствия. Сообщение 2. Анализ ситуации // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 2. С. 114–137. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-114-137>. EDN: FMUSDM.
3. Петрова А.С. Реализация экологических проектов Госкорпорацией «Росатом» // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 28–34. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-028-034>. EDN: LQZLNV.
4. Пинаев В.Е., Ледащева Т.Н., Головачёва И.В. Ликвидация накопленного экологического вреда – организационные и правовые аспекты. М.: Мир науки, 2023. 118 с.
5. Кабацкая Л.Н. Применение механизма государственно-частного партнерства при ликвидации накопленного вреда окружающей среде // Государственная власть и местное самоуправление. 2020. № 1. С. 15–20. <https://doi.org/10.18572/1813-1247-2020-1-15-20>. EDN: MHJTM D.



6. Выпханова Г.В. Теоретико-правовые и практические проблемы ликвидации накопленного вреда окружающей среде // Экологическое право. 2020. № 1. С. 11–13. <https://doi.org/10.18572/1812-3775-2020-1-11-13>. EDN: IANRMI.
7. Пичугин Е.А., Дьяков М.С., Зырянова Е.В., Соловьёва А.С. Аналитический обзор типовых технологических решений, применяемых при ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде // Астраханский вестник экологического образования. 2022. № 5. С. 20–32. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2022-5-20-32>. EDN: JOODKS.
8. Качор О.Л., Трусова В.В., Гантимурова С.А., Горячев И.Н., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (г. Свирск) 10 лет спустя: современное геохимическое состояние и анализ межгодовых изменений по данным дистанционного зондирования Земли // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 66–89. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.
9. Крупская Л.Т., Шугалей И.В., Возняковский А.П., Филатова М.Ю., Леоненко А.В. Теоретические основы оценки влияния техногенной системы на экосферу для обеспечения экологической безопасности // Экологическая химия. 2022. Т. 31. № 3. С. 148–157. EDN: MIDXYL.
10. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В. Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
11. Ашихмина Т.Я., Скугорева С.Г., Адамович Т.А., Товстик Е.В. Оценка состояния поверхностных водных объектов в районе полигона захоронения ядохимикатов // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 104–111. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-104-111>. EDN: YEGIGM.
12. Макаров И.Н. Влияние объектов накопленного вреда на окружающую среду в арктической территории Якутии (на примере хвостохранилища Депутатского ГОК) // Проблемы региональной экологии. 2023. № 5. С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-5-16-20>. EDN: KNYVSV.
13. Ашихмина Т.В., Каверина Н.В. Геоэкологический мониторинг накопленного экологического вреда при обращении с отходами животноводства в Воронежской области // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 4. С. 596–614. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-596-614>. EDN: JWXKVK.
14. Чертес К.Л., Букин А.А., Машкова А.И., Лаврусевич А.А., Тупицына О.В. Применение геофизических методов изысканий в проектах ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-56-60>. EDN: VZBEGJ.
15. Качор О.Л. Геоэкологическая оценка влияния накопленных отходов бывшего мышьяковистого завода поселка Вершино-Дарасунский на объекты окружающей среды // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 3. С. 279–286. EDN: UTZSWA.
16. Растинина Н.К., Крупская Л.Т., Голубев Д.А. Влияние горного техногенеза на окружающую среду и здоровье населения горняцкого поселка в Приамурье // Экологические системы и приборы. 2020. № 7. С. 41–50. <https://doi.org/10.25791/esip.07.2020.1170>. EDN: KBKUQY.
17. Кузнецова О.В., Качор О.Л., Матюхин И.А., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ как современная альтернатива традиционным спектральным методам при решении задач геохимических поисков // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 390–401. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMYIB.
18. Sarala P., Koskinen H. Application of the portable X-Ray Diffraction (pXRD) analyser in surficial geological exploration // Geologi. 2018. Vol. 70. P. 58–68.
19. Gazley M., Fisher L. A review of the reliability and validity of portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF) data // Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice Edition. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. P. 69–82.
20. Анисимов П.И., Пичугин Е.А. Оценка площади загрязненной территории вблизи объектов накопленного вреда окружающей среде // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 8. С. 42–47. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-8-42-47>. EDN: NNKJEL.

References

1. Alykova O., Arnaut Yu., Chuikova L., Chuikov Yu. Liquidation of objects of accumulated environmental damage within the framework of the federal project “General cleaning”. *Astrakhan Bulletin for Environmental Education*. 2023;4:51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-4-51-58>. EDN: TRXXCK.
2. Alykova O., Chuikova L., Chuikov Yu. Accumulated environmental damage: problems and consequences. Message 2. Analysis of the situation. *Astrakhan Bulletin for Environmental Education*. 2021;2:114-137. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-114-137>. EDN: FMUSDM.
3. Petrova A.S. Implementation of environmental projects by Rosatom State Corporation. *Theoretical and Applied Ecology*. 2023;4:28-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-028-034>. EDN: LQZLNV.
4. Pinaev V.E., Ledashcheva T.N., Golovacheva I.V. *Elimination of accumulated environmental damage: managerial and legal aspects*. Moscow: Mir nauki; 2023, 118 p. (In Russ.).
5. Kabatskaya L.N. Application of the public private partnership mechanism in liquidation of the accumulated damage to the environment. *State Power and Local Self-government*. 2020;1:15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.18572/1813-1247-2020-1-15-20>. EDN: MHJTMD.
6. Vypkhanova G.V. Theoretical, legal and practical issues of liquidation of the accumulated damage to the environment. *Environmental Law*. 2020;1:11-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18572/1812-3775-2020-1-11-13>. EDN: IANRMI.



7. Pichugin E.A., Dyakov M.S., Zyryanova E.V., Solovieva A.S. Analytical review of typical technological solutions used in the elimination of objects of accumulated environmental harm. *Astrakhan Bulletin for Environmental Education*. 2022;5:20-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2022-5-20-32>. EDN: JOODKS.
8. Kachor O.L., Trusova V.V., Gantimurova S.A., Goryachev I.N., Ikramov Z.L., Parshin A.V. The former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant (Svirsk, Russia) 10 years later: current geochemical state and interannual change analysis based on Earth remote sensing data. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):66-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.
9. Krupskaya L.T., Shugaley I.V., Voznyakovskiy A.P., Filatova M.Yu., Leonenko A.V. Theoretical foundations for assessing the impact of a man-made system on the ecosphere to ensure environmental safety. *Ecological Chemistry*. 2022;31(3):148-157. (In Russ.). EDN: MIDXYL.
10. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geoecological assessment of accumulated damage objects. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;4:65-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBXY.
11. Ashikhmina T.Ya., Skugoreva S.G., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Assessment of the state of surface water bodies in the area of the landfill for pesticides. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;1:104-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-104-111>. EDN: YEGIGM.
12. Makarov I.N. The impact of accumulated damage objects on the environment in the arctic territory of Yakutia: a case study of the tailing dump of the Deputatsky Mining and Processing Plant. *Regional Environmental Issues*. 2023; 5:16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-5-16-20>. EDN: KNYVSV.
13. Ashikhmina T.V., Kaverina N.V. Geoecological monitoring of accumulated environmental damage in the handling of livestock waste in the Voronezh Region. *Regional Geosystems*. 2022;46(4):596-614. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-596-614>. EDN: JWXKVK.
14. Chertes K.L., Bukin A.A., Mashkova A.I., Lavrushevich A.A., Tupitsyna O.V. Application of geophysical survey methods in projects for the elimination of objects of accumulated environmental damage. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(4):56-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-56-60>. EDN: VZBEGJ.
15. Kachor O.L. Environmental impact of the accumulated industrial waste: geo-ecological evaluation (a case study of the former arsenic plant, Vershino-Darasunsky settlement). *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(3):279-286. (In Russ.). EDN: UTZSWA.
16. Rastanina N.K., Krupskaya L.T., Golubev D.A. The impact of mining technogenesis on the environment and health of the population of a mining village in the Amur Region. *Ecological Systems and Devices*. 2020;7:41-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.07.2020.1170>. EDN: KBKUQY.
17. Kuznetsova O.V., Kachor O.L., Matyuhin I.A., Ikramov Z.L., Parshin A.V. Rapid X-ray fluorescence analysis as a modern alternative to traditional spectral methods in geochemical prospecting. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):390-401. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMXYIB.
18. Sarala P., Koskinen H. Application of the portable X-Ray Diffraction (pXRD) analyser in surficial geological exploration. *Geologi*. 2018;70:58-68.
19. Gazley M., Fisher L. A review of the reliability and validity of portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF) data. *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice Edition*. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 2014, p. 69-82.
20. Anisimov P.I., Pichiughin E.A. Assessment of the area of contaminated territory near facilities of accumulated environmental damage. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(8):42-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-8-42-47>. EDN: NNKJEL.

Информация об авторах / Information about the authors



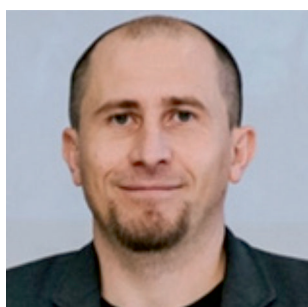
Качор Ольга Леонидовна,
доктор технических наук,
руководитель департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>
Olga L. Kachor,
Dr. Sci. (Eng.),
Head of Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>



Икрамов Зиёвиддин Лутфиддин угли,

инженер-исследователь,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0989>

Ziyoviddin L. Ikramov,
Research Engineer,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0989>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный руководитель института «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

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

Вклад авторов / Contribution of the authors

О.Л. Качор – разработка концепции, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

З.Л. Икрамов – проведение исследования, визуализация, курирование данных.

А.В. Паршин – разработка методологии, получение финансирования, административное руководство исследовательским проектом, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Olga L. Kachor – conceptualization, methodology, project administration, writing – original draft, writing – review & editing.

Ziyoviddin L. Ikramov – investigation, visualization, data curation.

Alexander V. Parshin – methodology, funding acquisition, project administration, writing – original draft, writing – review & editing.

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 27.11.2024; одобрена после рецензирования 06.12.2024; принята к публикации 13.12.2024.

The article was submitted 27.11.2024; approved after reviewing 06.12.2024; accepted for publication 13.12.2024.



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим специальностям:

- 1.6.9. Геофизика (технические науки);
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки);
- 2.8.1. Технология и техника геолого-разведочных работ (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию;

акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;

- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG/JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. В журнал принимаются статьи трех типов:

Научная статья. Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной области. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов.

Обзорная статья. Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов.



Краткое сообщение. Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском/китайском/монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и/или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение».

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. Если на рисунке имеются условные обозначения, они должны быть пронумерованы, а их расшифровку стоит выносить в экспликацию к рисунку. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат



PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG/JPEG (сохранение в формате PNG/JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.

Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперiodических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

Главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: sarhin@geo.istu.edu.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералогическо-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^{b✉}, А.Е. Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовых формаций. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Финансирование:

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^{b✉}, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.



Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 47 № 4 (89) 2024

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ю.А. Балашова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 27.12.2024 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,5.
Тираж 500 экз. Зак. 91. 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

