



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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 48 № 1 2025

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

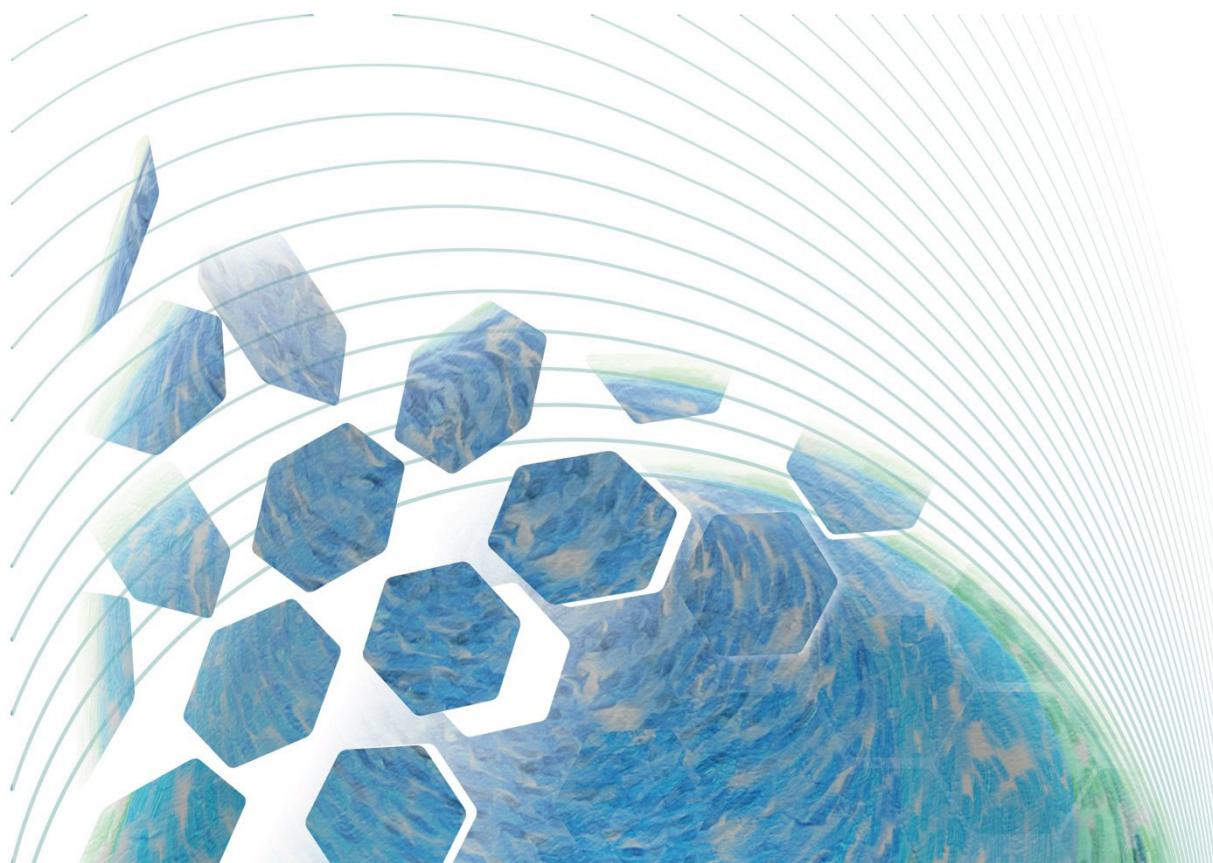
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 48 № 1 2025
Vol. 48 № 1 2025

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

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

Председатель редакционного совета:

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

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

Долгих М.Н., Иркутский национальный исследовательский технический университет (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, рассыпается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAII, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

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

Периодичность выхода – 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», 2025

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Chairman of the Editorial Council

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive secretary

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

The journal "Earth sciences and subsoil use" is 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, OAII (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiryak St., Yekaterinburg 620026, Russia). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	4
------------------------	---

Геоэкология

Качор О.Л., Паршин А.В., Икрамов З.Л., Трусова В.В., Курина А.В. О результатах исследований качества атмосферного воздуха в микрорайоне Иркутск-2 и поселке Боково (г. Иркутск, Юго-Западное Прибайкалье) методом снегогеохимической съемки	6
--	---

Геофизика

Константинов К.М., Скляров Е.В., Косарева Л.Р., Лавренчук А.В., Пушкарев Е.В., Константинов Г.К., Воробьева П.Н., Дугарова А.Е., Перова В.А., Пилипенко Н.И., Сиселятин Е.А., Тулесонова Э.Б. Петрофизические исследования магматических и метаморфических комплексов Ольхонского геодинамического полигона	24
--	----

Лазурченко А.В., Дмитриев А.Г., Мироманов А.В., Губанов А.Б. Опытно-методические геофизические и буровые работы для изучения геометрии, состояния и свойств скрытых фундаментов.....	50
---	----

Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Йоше А.К., Аузина Л.И. Анализ условий формирования и распределения ресурсов природных вод на территории Центральной Эфиопии (на англ. яз.).....	65
--	----

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

Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Особенности и оценка оползневой опасности на территории города Москвы	77
--	----

Онамун Д.Л.А., Дмитриев А.Г. Выявление турбидитовых коллекторов в бассейне Кот-д'Ивуар и прогноз их характеристик на основе 3D-сейсморазведки	88
--	----

Рапацкая Л.А. Перспективы нефтегазоносности и флюидодинамическая система Предплатомского прогиба	101
---	-----

Рупосов В.Л. Определение ураганных проб на основании модального анализа.....	112
---	-----

К сведению авторов.....	122
--------------------------------	-----



CONTENTS

Contents.....	5
---------------	---

Geoecology

Kachor O.L., Parshin A.V., Ikramov Z.L., Trusova V.V., Kurina A.V. On study results of atmospheric air quality in Irkutsk-2 microdistrict and Bokovo settlement (Irkutsk, Southwestern Baikal Region) using snow geochemical survey.....	6
--	---

Geophysics

Konstantinov K.M., Sklyarov E.V., Kosareva L.R., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Konstantinov G.K., Vorobyeva P.N., Dugarova A.E., Perova V.A., Pilipenko N.I., Siselyatin E.A., Tulesonova E.B. Petrophysical studies of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon geodynamic polygon.....	24
--	----

Lazurchenko A.V., Dmitriev A.G., Miromanov A.V., Gubanov A.B. Field trial geophysical and drilling works to study geometry, state and properties of hidden foundations	50
--	----

Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny

Yoshe A.K., Auzina L.I. Analysis of natural water resources formation and distribution conditions in Central Ethiopia	65
---	----

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

Krakhina E.A., Ekzarian V.N. Features and assessment of landslide hazard in Moscow	77
--	----

Onamoun D.L.A., Dmitriev A.G. Identification of Côte d'Ivoire basin turbidite reservoirs and their characteristics prediction based on 3D seismic survey	88
--	----

Rapatskaya L.A. PrePatom trough oil and gas potential and fluid dynamic system	101
--	-----

Ruposov V.L. Unusually high sample determination based on modal analysis	112
--	-----

Information for the Authors.....	122
----------------------------------	-----



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 502.335

EDN: NOSJSD

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-6-23



**О результатах исследований качества атмосферного воздуха
в микрорайоне Иркутск-2 и поселке Боково
(г. Иркутск, Юго-Западное Прибайкалье)
методом снегогеохимической съемки**

О.Л. Качор^a, А.В. Паршин^b, З.Л. Икрамов^c, В.В. Трусова^d, А.В. Курина^e

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

^{b,d}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме. Исследование снегового покрова является информативным методом комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха от различных техногенных источников, применимым на огромной площади северных территорий, для которых характерна длительная зима. При этом совершенствование методики снегогеохимической съемки способствует оптимизации решения таких актуальных задач освоения и сохранения геосистем северных районов, как оценка фонового состояния окружающей среды перед началом новых инфраструктурных или горнодобывающих проектов, мониторинг влияния известных объектов на природные и природно-антропогенные комплексы. Целью проведенного исследования являлась оценка экологического состояния воздуха в микрорайоне Иркутск-2 и в прилегающем к нему поселке Боково (Иркутск, Юго-Западное Прибайкалье, Восточная Сибирь). Актуальность исследования связана с участившимися в последние годы фактами органолептической и приборной фиксации загрязнения атмосферы, которые вызывают недовольство жителей микрорайона. Для установления и картирования районов и степени воздействия от основных известных хозяйственных объектов, а также выявления потенциально возможных новых источников была проведена детальная снегогеохимическая съемка. В ходе работы были отобраны пробы сезонного снега, изучен химический состав твердой фазы снегового покрова на исследуемой территории и построены карты распределения различных загрязняющих веществ, предоставлена интерпретация полученных данных. Основные результаты работы представлены в картографическом виде в данной статье, расширенный набор материалов в интерактивном виде, позволяющем сопоставить выявленные ареалы загрязнения с интересующими местоположениями, представлен на публичном геопортале института «Сибирская Школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета (geo.istu.edu). Полученные данные характеризуются высокой информативностью, их уверенно картируют, что позволяет считать экспрессный подход на основе неразрушающего рентгенофлуоресцентного анализа вполне эффективным вариантом снегогеохимической съемки.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, снеговой покров, экологический мониторинг, Иркутск, Иркутск-2

Для цитирования: Качор О.Л., Паршин А.В., Икрамов З.Л., Трусова В.В., Курина А.В. О результатах исследований качества атмосферного воздуха в микрорайоне Иркутск-2 и поселке Боково (г. Иркутск, Юго-Западное Прибайкалье) методом снегогеохимической съемки // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 6–23. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-6-23>. EDN: NOSJSD.

GEOECOLOGY

Original article

**On study results of atmospheric air quality in Irkutsk-2
microdistrict and Bokovo settlement (Irkutsk, Southwestern
Baikal Region) using snow geochemical survey**

Olga L. Kachora^a, Alexander V. Parshin^b, Ziyoviddin L. Ikramov^c,
Valentina V. Trusova^d, Anastasia V. Kurina^c

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

^{b,d}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The study of snow cover is an informative method for the comprehensive assessment of atmospheric air pollution from various man-made sources applicable to a vast area of the northern territories featuring long winter. At the same time,

© Качор О.Л., Паршин А.В., Икрамов З.Л., Трусова В.В., Курина А.В., 2025



improving the methodology of snow geochemical surveying helps optimize the solution of such urgent tasks of developing and preserving geosystems in northern regions as assessing the background state of the environment before starting new infrastructure or mining projects, monitoring the impact of explored objects on natural and anthropogenic complexes. The purpose of the study is to assess the ecological state of the air in the Irkutsk-2 microdistrict and in Bokovo settlement (Irkutsk, Southwestern Baikal Region, Eastern Siberia) adjacent to it. The relevance of the study is related to the currently increased frequency of organoleptic and instrument detection of atmospheric pollution, which causes the residents' discontent. A detailed snow and geochemical survey was carried out to identify and map the areas and the impact degree of the main known economic facilities, as well as identify potential new sources. The research involved taking seasonal snow samples, study of the chemical composition of the solid phase of the snow cover in the area under investigation, as well as mapping the distribution of various pollutants, and interpretation of the data obtained. The article presents the main results of the study in a cartographic form. An expanded set of interactive materials allowing to compare the identified pollution areas with the locations of interest is presented on the public geoportal of the Institute "Siberian School of Geosciences" of Irkutsk National Research Technical University (geo.istu.edu). The data obtained are characterized by high information content. They are confidently mapped, which makes it possible to consider the express approach based on non-destructive X-ray fluorescence analysis to be quite an effective variant of snow geochemical surveying.

Keywords: atmospheric pollution, snow cover, environmental monitoring, Irkutsk, Irkutsk-2

For citation: Kachor O.L., Parshin A.V., Ikramov Z.L., Trusova V.V., Kurina A.V. On study results of atmospheric air quality in Irkutsk-2 microdistrict and Bokovo settlement (Irkutsk, Southwestern Baikal Region) using snow geochemical survey. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):6-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-6-23>. EDN: NOSJSD.

Введение

Иркутская область входит в число регионов России с максимальным загрязнением атмосферного воздуха [1, 2], периодически становясь лидером антирейтинга¹. Проблемам оценки и мониторинга качества воздуха, снижения техногенного влияния посвящено множество работ. Вблизи известных промышленных предприятий и в различных районах Иркутска расположены несколько пунктов постоянных мониторинговых наблюдений [3]. Значительное количество исследователей, стремящихся получить более детальную в пространственном отношении информацию и оценить загрязнение на удалении от известных источников и пунктов наблюдений, используют геохимические [4–8] и биогеохимические² методики или прямое моделирование [2, 9] для оценки качества воздуха на значительных площадях. Для информационного обеспечения местных жителей существует множество различных источников, посвященных качеству воздуха: от регулярно выкладываемых на веб-ресурсы табличных данных,

отражающих усредненную ситуацию в районах в целом или отдельных населенных пунктах^{3,4}, до публичных геопорталов, позволяющих оценить распределение загрязняющих веществ на территории в картографическом виде с довольно высокой детальностью⁵. Регулярной практикой является специальная реакция ведомственных экологических организаций, научных организаций и прессы на информацию о потенциально аномальных состояниях атмосферы, поступающую непосредственно от населения⁶, которое, естественно, заинтересовано в максимально детализированной оценке того, каким именно качеством обладает воздух возле дома, школы, работы.

В последние годы участились случаи обращения в надзорные органы по вопросам неудовлетворительного состояния атмосферного воздуха от граждан, проживающих в микрорайоне Иркутск-2. Особую актуальность эта проблема приобрела в феврале – марте 2025 г., когда были зафиксированы не единичные случаи, а массовые обращения населения, так

¹ Названы самые проблемные по качеству воздуха регионы России // Лента.Ру. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2022/09/19/problemair/> (дата обращения: 30.01.2025).

² Самый экологичный район Иркутска – Юбилейный // Общественно-политическая газета «Областная». Режим доступа: <https://www.ogirk.ru/2025/03/05/samyj-ekologichnyj-rajon-irkutska-jubilejnyj/> (дата обращения: 05.03.2025).

³ Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха на территории деятельности «Иркутского УГМС» // Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Режим доступа: <https://www.irmeteo.ru/index.php?id=42> (дата обращения: 04.03.2025).

⁴ Индекс качества воздуха (AQI) в Irkutsk. Загрязнение воздуха // AQI.in. Режим доступа: <https://www.aqi.in/ru/dashboard/russia/irkutskaya-oblast/irkutsk> (дата обращения: 03.03.2025).

⁵ Геопортал Сибирской школы геонаук. Режим доступа: <https://geo.istu.edu> (дата обращения: 01.03.2025).

⁶ Роспотребнадзор проверил качество воздуха после жалоб иркутян // ИА «Телеинформ». Режим доступа: <https://i38.ru/zhkch-obichnie/rospotrebnadzor-proveril-kachestvo-vozducha-posle-zhalob-irkutyan> (дата обращения: 30.01.2025).



как большинство жителей Иркутска-2 не только ощущали неприятный запах воздуха, но и жаловались на ухудшение самочувствия⁷⁻⁹. Граждане, а затем и сотрудники Роспотребнадзора отмечали едкий химический запах. Подобные ситуации, как правило, связаны с присутствием в воздухе органических загрязнителей или примесей кислот. Такие запахи быстро различимы и позволяют оперативно сообщить о них в контролирующие органы для своевременного отбора проб и принятия дальнейших действий для их устранения и последующего недопущения попадания в атмосферу.

В то же время присутствие в воздухе, например, пылевых частиц с тяжелыми металлами не всегда может быть определено органами чувств человека, а значит, без должной на то причины и при отсутствии каких-либо дополнительных предпосылок попытки для их обнаружения предприняты не будут. Как и в большинстве промышленных районов Прибайкалья, природно-антропогенный комплекс Иркутска-2 и окружающих его территории не может не испытывать комплексной техногенной нагрузки от различных источников промышленности, теплоэнергетики, строительства, транспорта и т. д. Тем не менее только небольшое количество этих источников формирует воздействия, явно обнаруживаемые органолептически. В связи с этим для обеспечения населения микрорайона Иркутск-2 и органов власти информацией о комплексном состоянии окружающей среды следует провести детальное исследование антропогенной нагрузки на воздушную среду за продолжительный период времени. Длительный зимний период в Восточной Сибири позволяет применить для этого эффективный метод – снегогеохимическую съемку [10–16]. Снегогеохимические исследования обеспечивают одновременно высокую пространственную детальность, достоверность и значительный набор исследуемых параметров [17–19].

В 2024 году микрорайон Иркутск-2 и поселок Боково г. Иркутска стали очередными

объектами исследований программы изучения качества атмосферного воздуха, ежегодно реализуемой в рамках учебных дисциплин «Информационные технологии» и «Экологическая безопасность» студентов первого и второго курсов института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета. В конце февраля – начале марта, в период максимального накопления влагозапаса в снежном покрове (начало марта), на территории были проведены отбор проб снега, последующие лабораторные исследования, геостатистическая обработка и создание картографических материалов, представленных и охарактеризованных в данной статье, а также на геопортале «Качество атмосферного воздуха Иркутской области» (geo.istu.edu).

Материалы и методы исследования

Иркутск-2, расположенный на северо-западе Иркутска и входящий в состав Ленинского административного округа города, является обособленным микрорайоном, население которого составляет порядка 60 тыс. человек. В северной части к микрорайону примыкает поселок Боково. Вдоль всего микрорайона проходят железнодорожные пути Транссибирской железной дороги, отделяющие его от другого микрорайона Ленинского округа – Ново-Ленино.

Для того чтобы дать характеристику хозяйственной деятельности на рассматриваемой территории, в первую очередь были выделены известные потенциальные источники воздействия на атмосферу. Так, в Боково располагается компания «СтройПроектСервис», которая занимается строительством промышленных объектов, в частности производством вагон-домов и модульных зданий с использованием инертных материалов, СИП-панелей, металлоконструкций, бетона и др.

Микрорайон и примыкающий к нему поселок Боково непрерывно застраиваются. Удобная инфраструктура с множеством школ,

⁷ Службой Госэконадзора Приангарья выявлен источник загрязнения воздуха в Иркутске-2 // Служба государственного экологического надзора Иркутской области. Режим доступа: <https://irkobl.ru/sites/baikal/news/detail.php?ID=4062025> (дата обращения: 01.03.2025).

⁸ Роспотребнадзор вновь обнаружил загрязнение воздуха во Втором Иркутске // Ирк.ру. Режим доступа: <https://www.irk.ru/news/20250303/air/> (дата обращения: 04.03.2025).

⁹ Жители Иркутска-2 жаловались на ухудшающие здоровье выбросы с авиазавода // Альтайр. Режим доступа: https://altairk.ru/new/incident/zhiteli_irkutska-2_pozhalovalis_na_uhudshayushchie_zdorove_vibrosi_s_aviazavoda (дата обращения: 01.03.2025).



детских садов, наличием взрослой и детской поликлиник, больницы и роддома, парка отдыха, дворца культуры, бассейна, стадиона «Зенит», а также наличие крупнейшего предприятия района и источника большого количества рабочих мест – Иркутского авиационного завода создают привлекательные условия для проживания. На данный момент в Иркутске-2 возводятся сразу несколько современных жилых комплексов: «Взлетка», «Пулковский», «Иркут», «Витязь-3», Zenith.

Крупным объектом негативного воздействия на окружающую среду микрорайона и поселка является Иркутский авиационный завод (ИАЗ) – филиал ПАО «Яковлев», занимающийся выпуском летательных аппаратов. Он расположен на двух площадках: основной (территория 1), расположенной к северо-западу от микрорайона и занимающей значительную площадь, и дополнительной, расположенной внутри микрорайона (территория 2). На указанных территориях ведется металлургическое производство – работают литейный, кузнецкий, термический и другие цеха, механосборочное производство со слесарно-сварочным, механосборочным цехами и пр., агрегатно-сборочное производство, где в разных цехах выполняется сверление, выполнение клепаных и болтовых соединений деталей, герметизация и заготовительно-штамповочное производство, включающее заготовительный, штамповочный цеха¹⁰⁻¹³.

По данным, представленным в государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2023 году»¹³, в выбросах Иркутского авиационного завода присутствуют такие загрязняющие вещества, как оксид алюминия, диоксид титана, металлическая пыль, оксид железа, оксид магния, оксид меди, растворимые соли алюминия, свинец и его соединения, шестивалентный хром, оксид цинка, ферроцианид железа, мазутная зола, пыль неорганическая до 20 % оксида кремния (SiO_2), пыль неор-

ганическая более 70 % SiO_2 , зола угольная, пыль неорганическая SiO_2 (20–70 %), пыль стеклопластика, пыль меховая (войлокная), корунд белый, пыль древесная, пыль латуни, карбонат калия, хлорат магния, марганец и его соединения, растворимые соли никеля, оксид олова, хром трехвалентный, хлорид бария, бром.

На территории 1 расположены две котельные, одна из которых работает на угле, другая – на мазуте¹³. На территории 2 находится одна котельная, работающая на угле. По данным, представленным в государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2023 году», именно котельные являются основными загрязнителями атмосферы на заводе, поскольку их выбросы составляют 98,5 % валовых выбросов всего предприятия¹³. Кроме того, в пределах рассматриваемой территории расположены неидентифицированные промышленные площадки, информация о точном характере деятельности которых отсутствует в открытых источниках, а также очистные сооружения Иркутского авиационного завода.

11 марта 2024 г., в период максимального накопления влагозапаса в снежном покрове, сотрудниками и студентами института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета был проведен отбор проб снега с целью оценки качества атмосферного воздуха в микрорайоне Иркутск-2 и частично в поселке Боково. Всего было отобрано 25 проб снега (рис. 1). На значительном удалении от жилых домов и дорог в лесной зоне была отобрана фоновая проба.

Проведенный пробоотбор снега был произведен с учетом требований ГОСТ Р 70282-2022 «Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Общие требования к отбору проб льда и атмосферных осадков»¹⁴. Пробы отбирались с открытых площадок, расположенных на удалении от автодорог

¹⁰ Люди с железной хваткой // Dzen.ru. Режим доступа: <https://dzen.ru/a/YnuksXYWbQ1X0lq9> (дата обращения: 30.01.2025).

¹¹ «Город изнутри»: Иркутский авиазавод // Ирсити.ру: сетевое издание. Режим доступа: <https://ircity.ru/text/economics/2014/11/12/70543445/> (дата обращения: 30.01.2025).

¹² Как делают самолеты Су-30 и Як-130. Иркутский авиационный завод // DRIVE2.RU: автомобильная социальная сеть // Drive2.ru. Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/1385365/> (дата обращения: 30.01.2025).

¹³ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2023 году». Иркутск: Максима, 2024. 308 с.

¹⁴ ГОСТ Р 70282-2022. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Общие требования к отбору проб льда и атмосферных осадков. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 8 с.

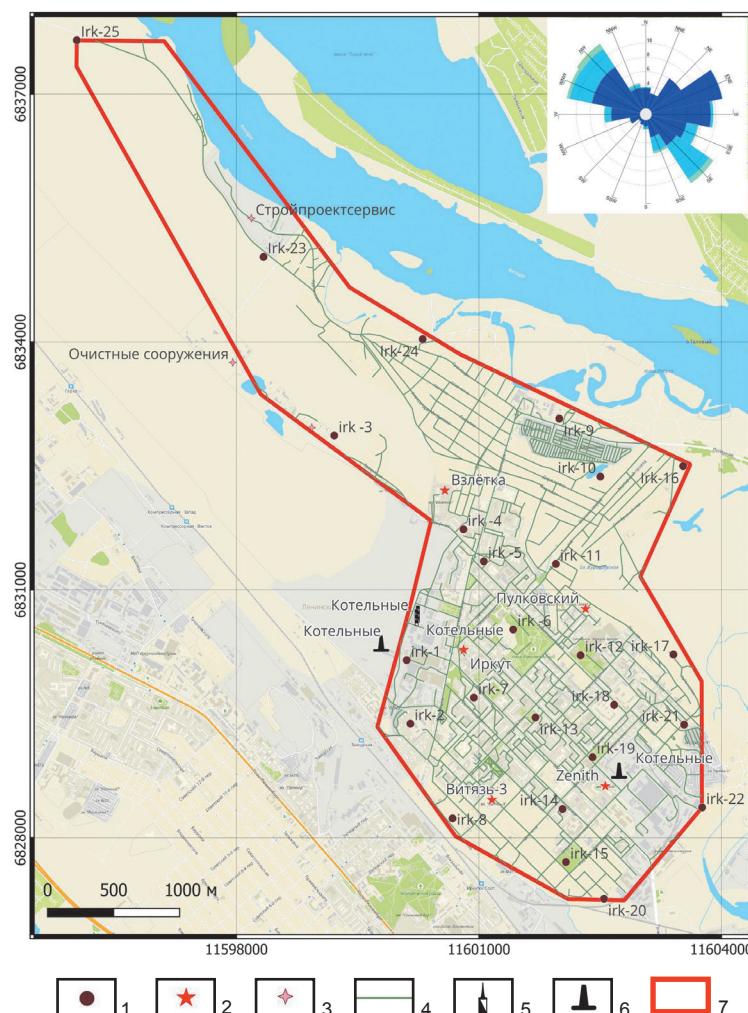


Рис. 1. Схема отбора проб снега в микрорайоне Иркутск-2 и поселке Боково:

1 – точки пробоотбора; 2 – новостройки; 3 – промышленные объекты; 4 – дороги; 5 – котельная, работающая на мазуте; 6 – котельная, работающая на угле; 7 – граница исследованного участка

Fig. 1. Diagram of snow sampling in the Irkutsk-2 microdistrict and Bokovo settlement:

1 – sampling points; 2 – recent development; 3 – industrial facilities; 4 – roads; 5 – boiler house operating on fuel oil; 6 – boiler house operating on coal; 7 – boundary of the surveyed area

или других явных источников локальных воздействий, с помощью пластиковых лопаток, и помещались в полиэтиленовые мешки. Глубина сугроба и площадь лунки фиксировались, площадь лунок составляла не менее 50×50 см.

После отбора пробы снега доставлялись в Химико-аналитическую лабораторию Сибирской школы геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, где после снеготаяния и фильтрации анализировались твердый остаток на фильтрах и отфильтрованная талая вода. Твердый остаток высушивался при комнатной температуре и взвешивался с помощью лабораторных весов Analytical XP204 с чувствительностью $\pm 0,1$ мг.

Анализ твердого остатка проводился методом рентгенофлуоресцентного анализа [20].

Химический анализ проб на содержание металлов в талой сугробной воде проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанным плазмой (ICP-AES, от англ.: Inductively coupled plasma, Atomic emission spectroscopy).

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные благодаря проведенному исследованию результаты были подвергнуты предварительному математическому анализу с целью изучения диапазонов их изменчивости и оценки качества получаемого химико-аналитического результата (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что рентгенофлуоресцентный анализ обеспечивает достаточную чувствительность для исследования вариа-

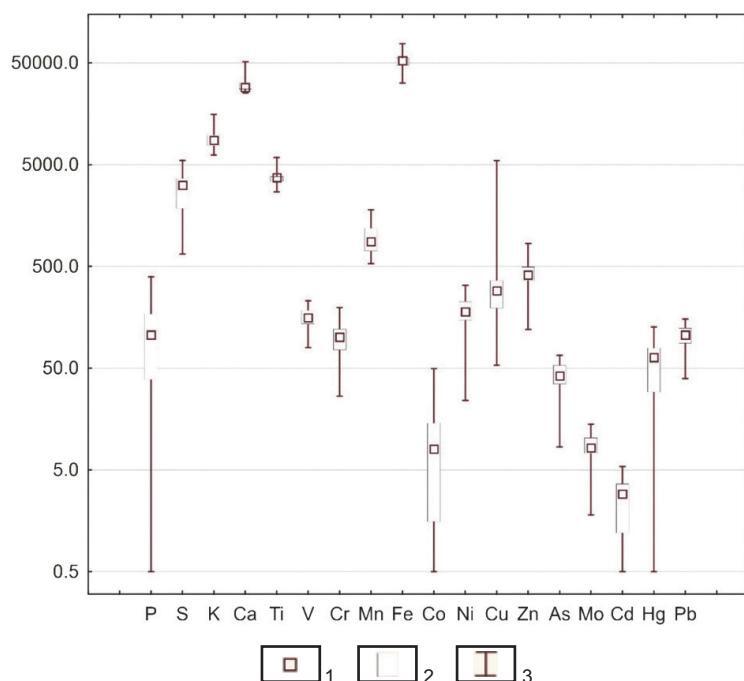


Рис. 2. Диаграммы размаха для результатов химико-аналитических исследований твердого остатка:

1 – медиана; 2 – 25–75 %; 3 – минимум – максимум

Fig. 2. Range diagrams for the results of chemical analytical studies of solid residue:

1 – median; 2 – 25–75 %; 3 – minimum – maximum

бельности концентраций основных тяжелых металлов и ряда других химических параметров в твердом остатке. Все указанные параметры имеют существенную изменчивость, медианные значения их концентраций лежат выше пределов обнаружения используемой аппаратуры [20]. Визуально сомнения может вызвать показатель кадмия (Cd), тем не менее

и в этом случае медианное значение концентрации составляет 2,9 ppm при пределе обнаружения в 2 ppm, следовательно все данные могут быть подвергнуты дальнейшему анализу и интерпретации. Для всех определенных в твердом остатке снежного покрова веществ были рассчитаны коэффициенты корреляции, представленные на рис. 3.

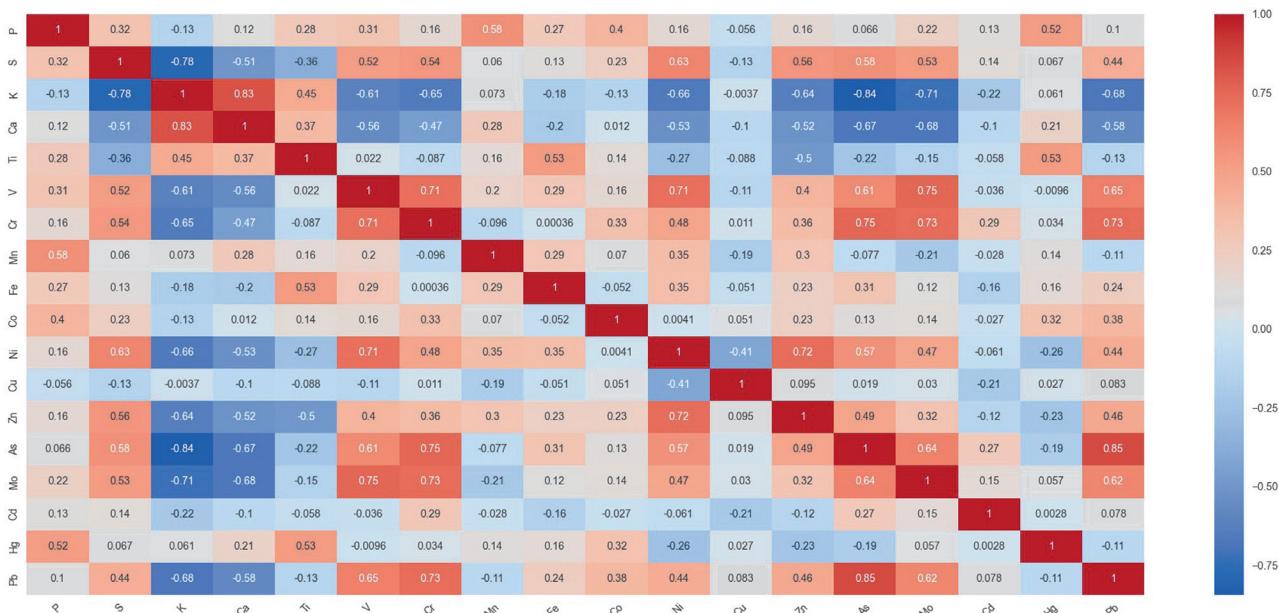


Рис. 3. Коэффициенты корреляции загрязняющих веществ, выявленных в твердом остатке
Fig. 3. Correlation coefficients of pollutants detected in solid residue

Как показано на рис. 3, существует хорошая корреляционная зависимость между мышьяком и свинцом (0,85) и мышьяком и хромом (0,75), а также между хромом и свинцом (0,73). Это позволяет сделать вывод об общем источнике происхождения трех указанных загрязнителей атмосферного воздуха. У хрома также установлена корреляционная связь с молибденом (0,73), со свинцом и мышьяком у этого компонента связь слабее: 0,64 и 0,62 соответственно. У меди значимых корреляционных связей ни с кем не установлено. Подобная ситуация с отсутствием корреляции и у кобальта. У марганца также значимых корреляционных связей не обнаружено. Для никеля установлены корреляционные связи с цинком (0,72) и ванадием (0,71). Для цинка других значимых корреляций не обнаружено.

Исходя из полученных корреляционных связей, были выбраны и представлены наиболее

информационные карты распределения, позволяющие оценить качество воздуха в изучаемом районе. При этом в первую очередь следует отметить, что нормативов содержания загрязняющих веществ в жидкой или твердой фазе (нерастороженный остаток на фильтрах) снега не существует, вследствие чего интерпретировать картографические представления возможно только при сравнении обнаруженных концентраций с содержанием в фоновых пробах.

Что касается результатов исследований снеговой воды, то в этом случае дополнительно обосновывать достаточную чувствительность стандартно применяемой в таких задачах методики ICP-AES необходимости нет. В таблице представлена основная описательная статистика полученных измерений в сопоставлении с принятыми фоновыми параметрами.

В качестве фона в таблице представлены результаты анализа снежного покрова, ото-

Концентрации некоторых веществ в снеговой воде Concentrations of some substances in snow melt water

Точка пробоотбора	Массовая доля содержания химических элементов, мг/дм ³								
	K	Ca	Si	Mg	Cu	As	Na	Pb	Zn
IRK-20	0,66	7,1	0,13	1,09	0,004	<0,005	0,56	<0,003	0,015
IRK-2	7,5	7,8	0,72	1,55	0,019	0,007	0,59	0,003	0,022
IRK-14	1,8	10,3	0,325	1,33	0,005	<0,005	0,56	<0,003	0,013
IRK-1	1,27	7,5	0,24	1,08	0,005	<0,005	1,30	<0,003	0,015
IRK-13	5,00	8,2	0,27	1,32	0,013	<0,005	0,67	<0,003	0,015
IRK-11	1,69	6,2	0,17	0,89	0,006	<0,005	0,23	<0,003	0,009
IRK-7	0,59	7,6	0,13	0,77	0,003	<0,005	0,39	<0,003	0,016
IRK-19	0,082	8,7	0,18	1,12	0,003	<0,005	0,60	<0,003	0,011
IRK-21	3,76	7,9	0,3	1,05	0,007	<0,005	1,07	<0,003	0,019
IRK-15	0,57	7,5	0,13	1,12	0,003	<0,005	0,41	<0,003	0,012
IRK-5	2,53	6,5	0,21	0,91	0,067	<0,005	0,50	<0,003	0,014
IRK-4	4,09	11,5	0,29	1,59	0,014	<0,005	0,68	<0,003	0,026
IRK-10	0,28	3,7	0,15	0,52	0,002	<0,005	0,16	<0,003	0,035
IRK-8	0,74	7,0	0,14	0,90	0,004	<0,005	0,29	<0,003	0,012
IRK-6	0,80	19,8	1,02	1,54	0,003	<0,005	0,45	<0,003	0,006
IRK-3	0,26	6,5	0,19	0,74	0,003	<0,005	0,18	<0,003	0,009
IRK-23	0,89	11,8	0,51	1,15	0,002	<0,005	0,49	<0,003	0,003
IRK-9	1,02	6,2	0,19	0,90	0,004	<0,005	0,86	<0,003	0,005
IRK-17	0,81	9,1	0,27	1,11	0,005	<0,005	0,34	<0,003	0,008
IRK-12	0,62	8,7	0,12	0,84	0,003	<0,005	0,38	<0,003	0,010
IRK-18	1,08	9,8	0,15	1,26	0,003	<0,005	0,69	<0,003	0,006
IRK-25	2,76	7,3	0,19	1,11	0,005	<0,005	0,60	<0,003	0,030
IRK-22	1,80	9,1	0,21	1,1	0,007	<0,005	0,56	<0,003	0,013
IRK-24	1,26	7,3	0,14	0,71	0,004	<0,005	0,45	<0,003	0,013
Фон	<1	0,3	<0,05	0,06	0,004	<0,005	<1	<0,001	0,006
Превышение в <i>n</i> раз	7,5–1,02	66–12,3	20,4–2,6	26,5–11,8	16,75–1,25	–	1,3–1,07	–	5,8–1,3

бранного в районах, не подверженных антропогенному влиянию (Арктические районы Сибири, Дальнего Востока). Среднее содержание таких веществ, как калий, кальций, кремний, магний, медь, мышьяк, натрий, свинец, цинк в талой снежной воде этих территорий имеет следующие значения в $\text{мг}/\text{дм}^3$: К < 1; Ca 0,3; Si < 0,05; Mg 0,06; Cu (0,001–0,0067); As < 0,005; Na < 1; Pb < 0,001–0,002; Zn < 0,005–0,0063 [21]. При этом твердой фазы (нерасторимого твердого остатка на фильтрах) в количестве, пригодном для анализа, в таких пробах вообще нет, поскольку существенная пылевая нагрузка зачастую является особенностью снега только в районах с антропогенной деятельностью или на природных территориях с явными

естественными источниками пыли в зимний период (обильное выветривание).

Из таблицы видно, что в снеговой воде растворимых форм мышьяка и свинца в содержаниях, превышающих предел обнаружения, практически нет (за исключением пробы IRK-2, где превышение крайне незначительно – в 1,4 и 1,1 раза соответственно). Превышение содержания натрия также незначительно (в 1,3 и 1,07 раза), оно отмечалось всего в двух точках: IRK-1 и IRK-21. По калию отмечается превышение от 1,02 до 7,5 раза в 13 точках. А по кальцию – во всех обследованных пробах с диапазоном превышений от 12,3 до 66 раз. Такая же ситуация отмечена с содержанием кремния и магния, которые присутствуют во всех указанных точках

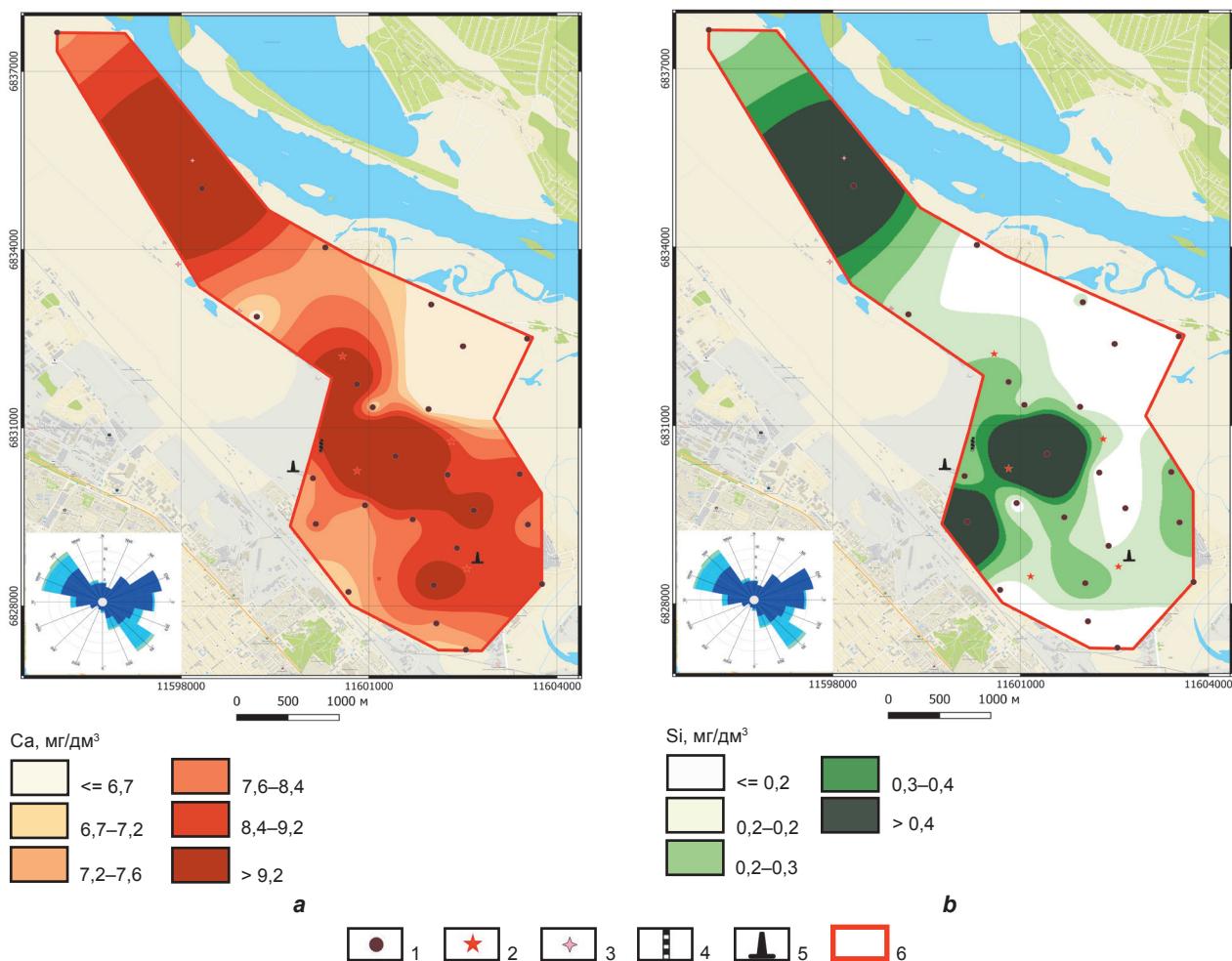


Рис. 4. Карты распределения концентраций кальция и кремния в малой снежной воде на территории микрорайона Иркутск-2:

a – распределение концентрации кальция; b – распределение концентрации кремния
1 – точки пробоотбора; 2 – новостройки; 3 – промышленные объекты; 4 – котельная, работающая на мазуте; 5 – котельная, работающая на угле; 6 – граница исследованного участка

Fig. 4. Maps of calcium and silicon concentration distribution in snow melt water in the territory of the Irkutsk-2 microdistrict:

a – calcium concentration distribution; b – silicon concentration distribution
1 – sampling points; 2 – recent development; 3 – industrial facilities; 4 – boiler house running on fuel oil;
5 – boiler house running on coal; 6 – boundary of the investigated area



с диапазонами превышения от 2,6 до 20,4 и от 11,8 до 26,5 раза соответственно. Кроме этого, в талой воде обнаружены превышения фона по тяжелым металлам: медь превышает фон в 10 точках с диапазонами концентраций от 1,25 до 16,75, а цинк в 20 точках, но с меньшим превышением (от 1,3 до 5,8 раза). На основании данных ICP-AES были построены карты распределения обнаруженных веществ с наиболее значимыми диапазонами изменения концентрации на исследованной территории. (рис. 4, 5)

Как показано на рис. 4, основные ареалы кальция распространены в центральной части микрорайона и на территории вблизи компании «СтройПроектСервис». Основные зоны загряз-

нения кремнием пространственно приурочены к территории Иркутского авиационного завода, к центральной части микрорайона, включая парковую зону, а также и к его юго-западной части, находящейся рядом с железнодорожными путями.

На рис. 5 показано, что самыми чистыми зонами в отношении загрязнения талой воды цинком являются парк, территория больницы и частный сектор в восточной части микрорайона Иркутск-2, а также за пределами поселка Боково, в районе расположения компании «СтройПроектСервис». В зону повышенного загрязнения входит новый жилой комплекс «Взлетка».

По содержанию меди картинка менее мозаичная – основные ареалы загрязнения сконцен-

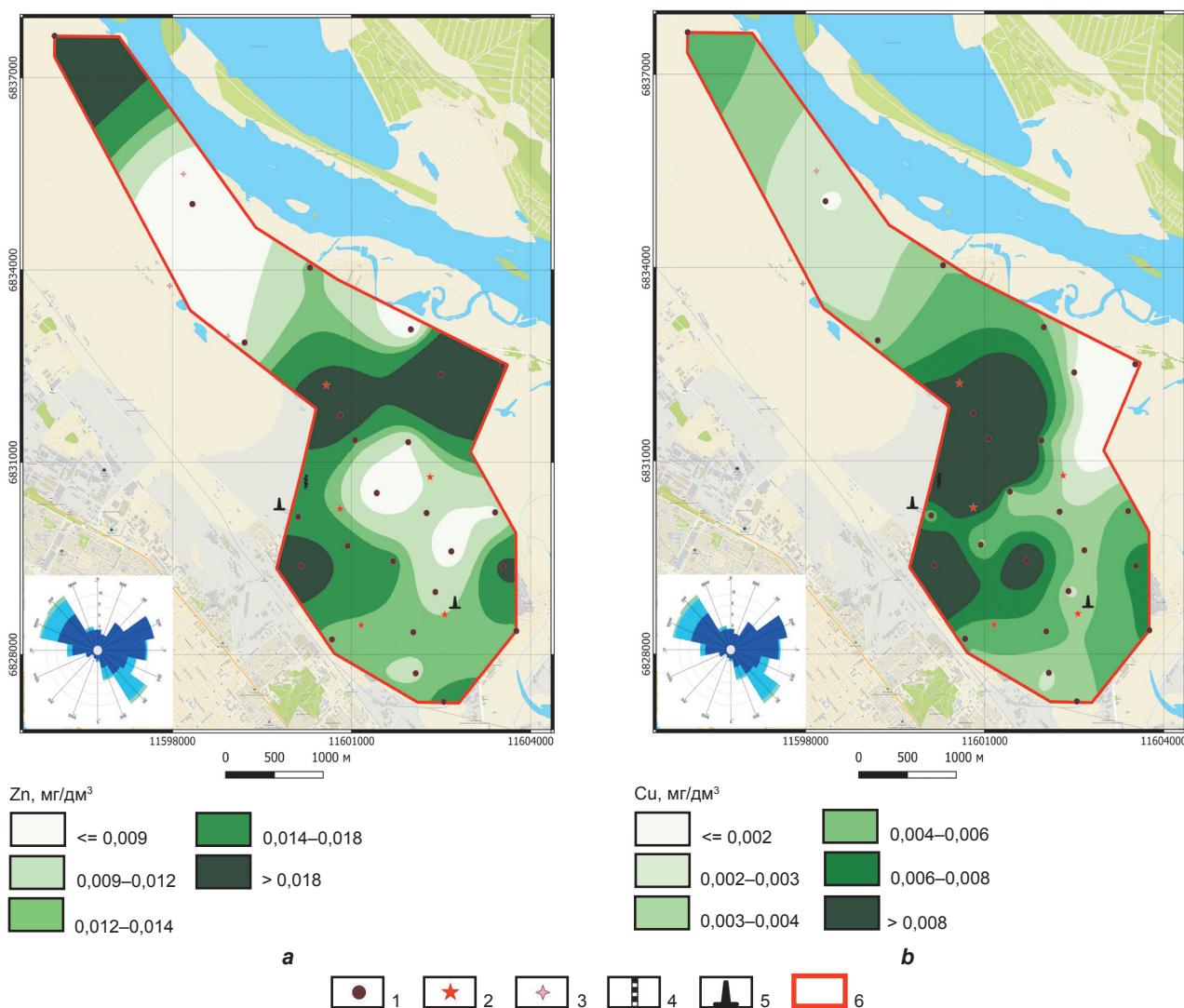


Рис. 5. Карты распределения концентраций цинка и меди в талой снежной воде на территории микрорайона Иркутск-2:
a – распределение цинка; b – распределение меди

Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 5. Maps of zinc and copper concentration distribution in snow melt water in the territory of the Irkutsk-2 microdistrict:
a – zinc distribution; b – copper distribution
The symbols are shown in Fig. 4



трированы вдоль территории Иркутского авиационного завода и железнодорожных путей. Концентрация меди начинает падать с удалением от этих участков. В зону загрязнения медью попадают 2 новостройки, которые относятся к жилым комплексам «Взлетка» и «Иркут».

На рис. 6–9 представлены карты распределения некоторых загрязняющих веществ в твердом остатке после фильтрования снеговой воды. В статье представлены карты распределения меди, свинца, мышьяка, хрома, кобальта, марганца, никеля и цинка. При этом мышьяк и свинец относятся к загрязня-

ющим веществам I класса опасности, медь, кобальт, никель, хром – к загрязняющим веществам II класса опасности. За фоновые значения в твердом остатке были приняты усредненные результаты проб, отобранных в лесном массиве далеко за пределами влияния различных источников негативного воздействия.

Как показано на рис. 6, основные зоны аномалий мышьяка и свинца имеют несколько схожий характер. На юго-западе зоны загрязнения в основном приурочены к железнодорожным путям, на юго-востоке – к дополн-

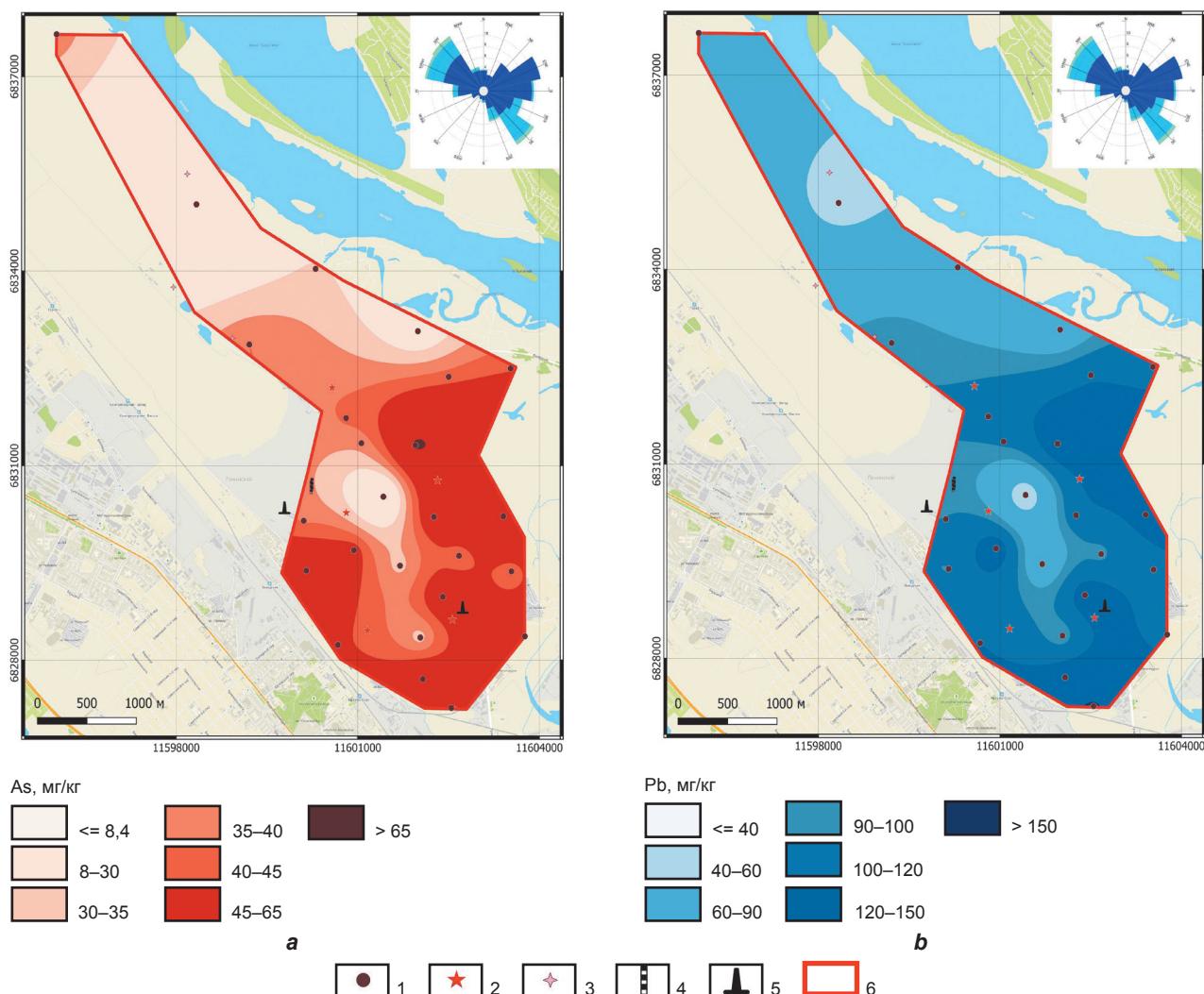


Рис. 6. Карты распределения концентрации мышьяка и свинца в твердом остатке (вещества I класса опасности):

a – распределение концентрации мышьяка (показатель фонового значения мышьяка равен 8,4 мг/кг);
 b – распределение концентрации свинца (показатель фонового значения свинца равен 53,5 мг/кг)

Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 6. Maps of arsenic and lead concentration distribution in solid residue (hazard class I substances):

a – arsenic concentration distribution (the indicator of the background value of arsenic is 8.4 mg/kg);
 b – lead concentration distribution (the indicator of the background value of lead is 53.5 mg/kg)

The symbols are shown in Fig. 4

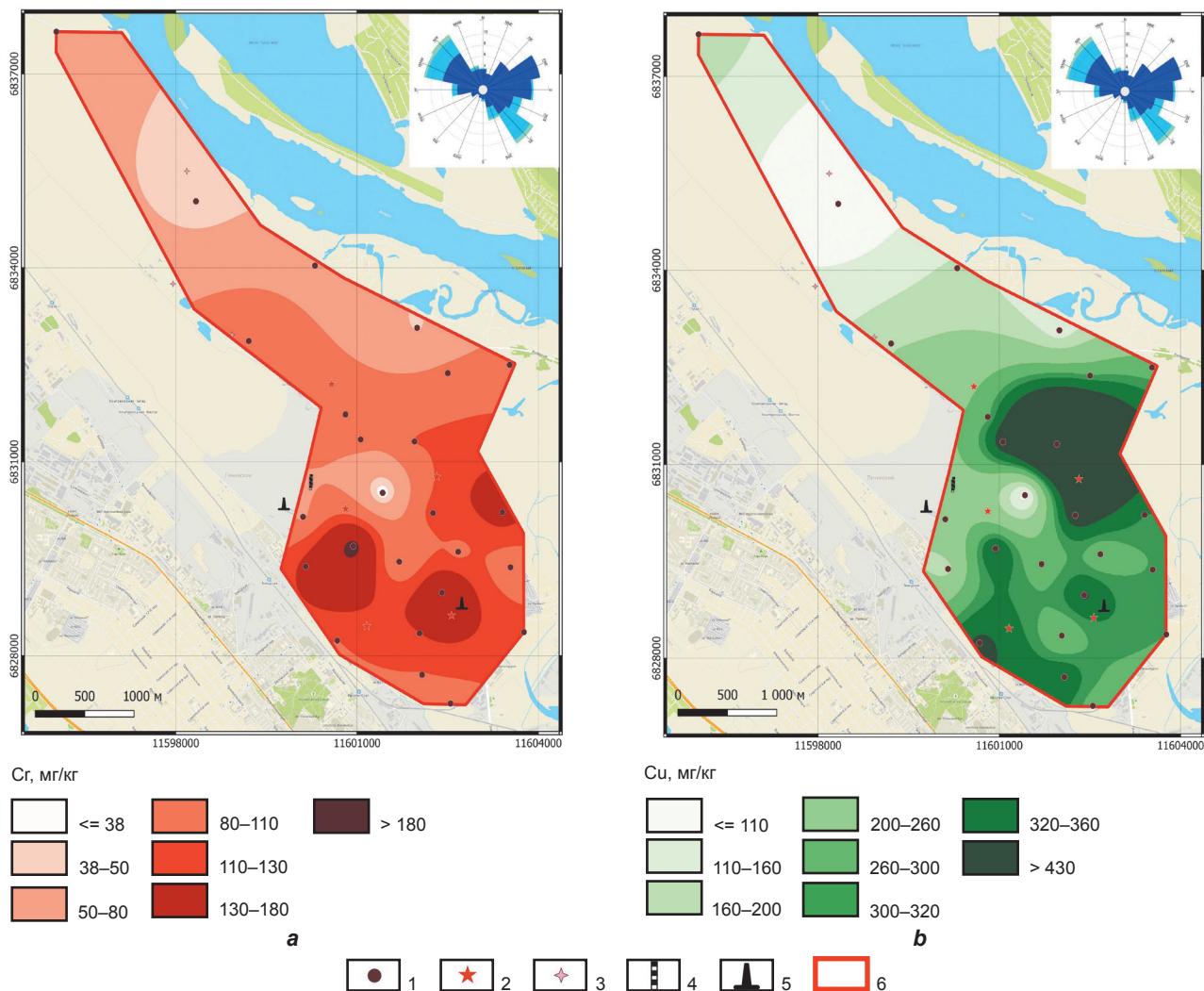


Рис. 7. Карты распределения концентраций хрома и меди в твердом остатке (вещества II класса опасности):
(a – распределение концентрации хрома (показатель фонового значения хрома равен 38 мг/кг);

b – распределение концентрации меди (показатель фонового значения меди равен 53,5 мг/кг);
Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 7. Maps of chromium and copper concentration distribution in solid residue (hazard class II substances):

a – chromium concentration distribution (the background value of chromium is 38 mg/kg);
b – copper concentration distribution (the background value of copper is 53.5 mg/kg)

The symbols are shown in Fig. 4

нительной территории 2 Иркутского авиационного завода – «Объект». Источники аномалий в районе частного сектора на восточной стороне пока не установлены. Наибольшие превышения по мышьяку составили около 7,7 раза, при этом выделяются и условно чистые зоны (без превышения фона). Загрязнение свинцом присутствует на всей изучаемой территории со средним превышением фона от 1,5 до 3 раз.

Карта распределения хрома напоминает зоны аномалий по мышьяку и свинцу (см. рис. 6) – юго-западная, южная и вос-

точная части микрорайона. Вероятно, эти токсиканты имеют общие источники загрязнения. Максимальные уровни превышения фона по хрому составляют 4,7 раза с совместным загрязнением минимум в 1,3 раза. Основная зона загрязнения медью, в которой зафиксировано превышение относительного фонового значения (53,5 мг/кг) в 8 раз, расположена к востоку от Иркутского авиационного завода в соответствии с розой ветров.

Как показано на рис. 8, наиболее значительные аномалии с максимальным со-

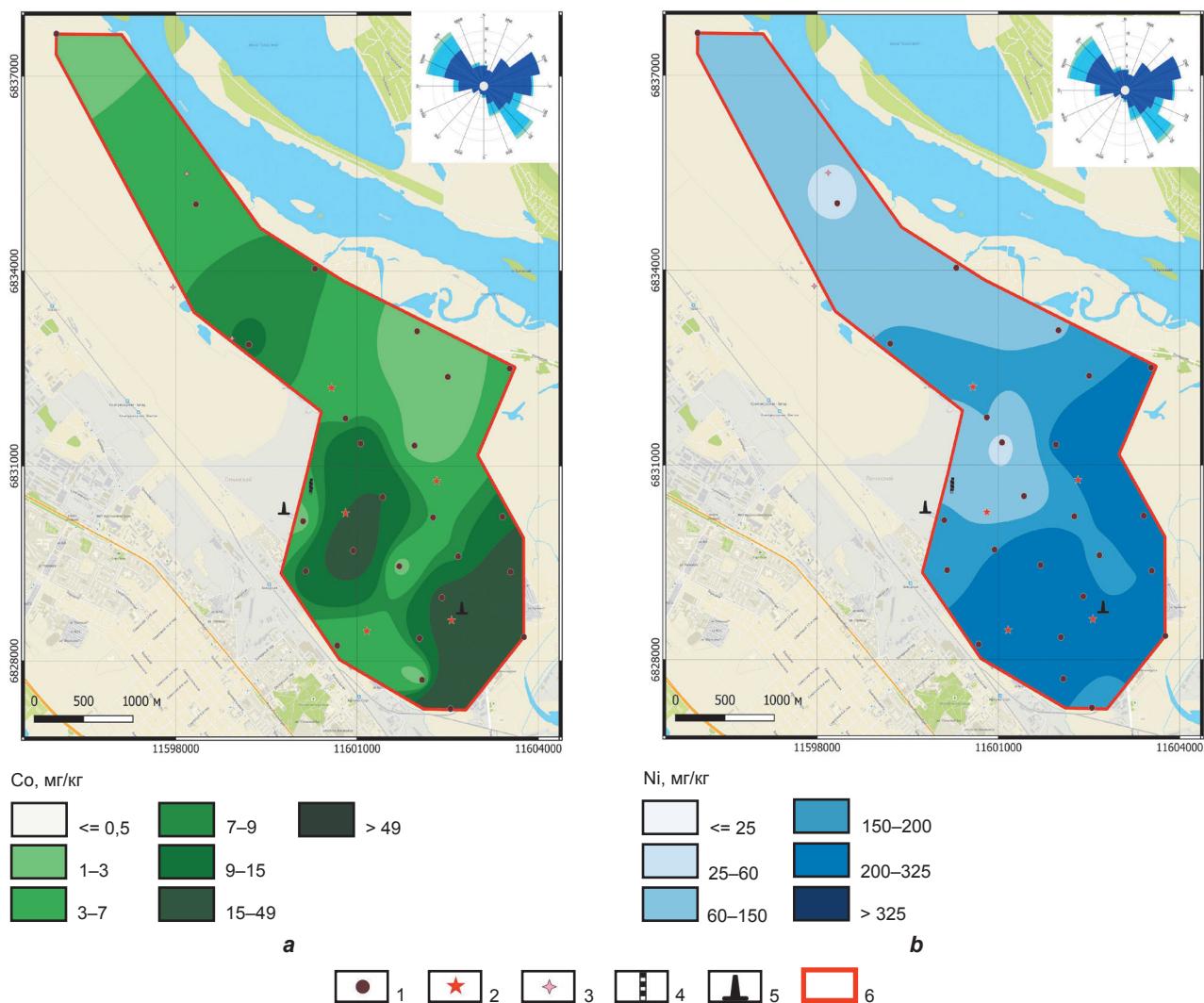


Рис. 8. Карты распределения концентраций кобальта и никеля в твердом остатке (вещества II класса опасности):

a – распределение кобальта (показатель фонового значения кобальта равен 5,1 мг/кг);
b – распределение никеля (показатель фонового значения никеля равен 48,5 мг/кг)

Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 8. Maps of cobalt and nickel concentration distribution in solid residue (hazard class II substances):

a – cobalt distribution (the indicator of the background value of cobalt is 5.1 mg/kg);
b – nickel distribution (the indicator of the background value of nickel is 48.5 mg/kg)

The symbols are shown in Fig. 4

держанием кобальта (с превышением фона почти в 10 раз) расположены вдоль улицы Новаторов между перпендикулярными ей улицами Авиастроителей и Ленинградской, а также к юго-востоку от территории-2 Иркутского авиационного завода. В этой зоне расположены жилые комплексы Zenith и «Иркут». Основные аномалии относительно содержания никеля также визуально совпадают с данными, представленными на картах распределения концентраций мышьяка и свинца (см. рис. 6) с максимальным превышением над фоном в 6,7 раза.

На рис. 9 показано, что основная аномалия по концентрации цинка связана с таким источником загрязнения, как угольная котельная, которая расположена на территории 2 Иркутского авиационного завода, с распространением загрязнения в соответствии с розой ветров. Наибольшие превышения относительно фона составляют от 7 раз. Основная зона загрязнения марганцем сконцентрирована на юге микрорайона, однако даже там превышения незначительные – в среднем в 1,5 раза.

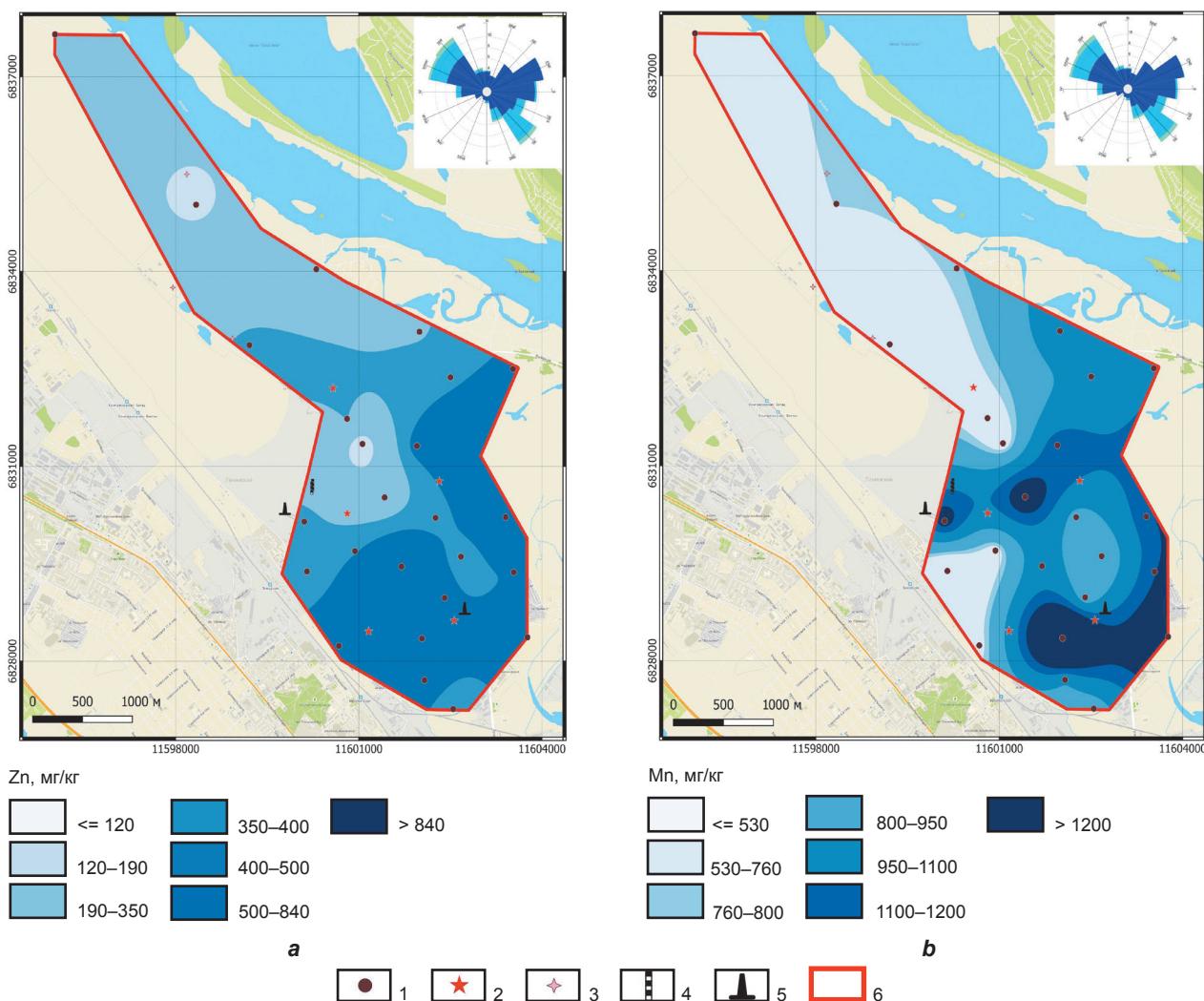


Рис. 9. Карты распределения концентраций цинка и марганца в твердом остатке:

*a – распределение концентрации цинка (показатель фонового значения цинка равен 120 мг/кг);
b – распределение концентрации марганца (показатель фонового значения марганца равен 762,5 мг/кг)*

Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 9. Maps of zinc and manganese concentration distribution in solid residue:

a – zinc concentration distribution (the indicator of the background value of zinc is 120 mg/kg);

*b – manganese concentration distribution (the indicator of the background value of manganese is 762.5 mg/kg)
The symbols are shown in Fig. 4*

Заключение

По результатам исследования состояния атмосферного воздуха на основании данных проведенной в 2024 г. снегогеохимической съемки в Иркутске-2 и поселке Боково появилась возможность охарактеризовать загрязнение воздуха в исследованном районе. Благодаря проведению анализа жидкой фазы снега было установлено загрязнение атмосферного воздуха растворимыми формами цинка и частично меди. Такой тип загрязнения вместе с водой хорошо переходит в почву, а затем в растения по трофической цепи. Участки с высоким уровнем техногенной нагрузки по указанным элементам расположены в районе

остановки общественного транспорта «Авиазавод» и тянутся в сторону поселка Боково вдоль улицы Морской проезд, второй ареал загрязнения расположен близ железнодорожной станции «Заводская». Основные ареалы загрязнения медью сконцентрированы вдоль улицы Новаторов и в районе станции «Заводская».

По результатам изучения твердой фазы снегового покрова – нерастворимых частиц загрязняющих веществ, переносимых вместе с пылевыми частицами, можно выделить две явные ассоциации токсикантов. В первую входят мышьяк, свинец и хром, основные ареалы повышения концентраций которых расположены



жены в юго-западной зоне близ железнодорожных путей, в юго-восточной части – около территории второй промплощадки Иркутского авиационного завода, и в восточной – в районе частного сектора. В этих аномалиях превышения мышьяка относительно фонового значения составило 7,7 раза, свинца – до 3 раз, хрома – 4,7 раза. В зону влияния этой ассоциации входит большая часть микрорайона Иркутск-2, включающая такие новые жилые комплексы,

как «Пулковский», «Витязь-3», Zenith. Во вторую ассоциацию, связанную с зоной влияния территории второй промплощадки Иркутского авиационного завода, входят цинк и никель. Превышение над фоном этих двух токсикантов составляет 6,7–7 раз. Отдельную аномалию представляет загрязнение медью с максимальным превышением в 8 раз территории, расположенной к востоку от Иркутского авиационного завода в соответствии с розой ветров.

Список источников

1. Клюев Н.Н., Яковенко Л.М. «Грязные» города России: факторы, определяющие загрязнение атмосферного воздуха // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 2. С. 237–250. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-2-237-250>. EDN: VODDOE.
2. Ахтиманкина А.В. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2017. Т. 26. С. 15–27. EDN: ZFPJUF.
3. Новикова С.А. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Иркутска // Национальные приоритеты России. 2019. № 1. С. 50–56. EDN: PDSWKT.
4. Просекин С.Н., Амосова А.А., Чубаров В.М., Бычинский В.А. Оценка эколого-геохимического состояния техногенно-нагруженных пригородных районов г. Шелехов и г. Иркутск по данным снегогеохимического мониторинга // Геосферные исследования. 2023. № 3. С. 140–153. <https://doi.org/10.17223/25421379/28/10>. EDN: JSGKSM.
5. Лисецкая Л.Г., Шаяхметов С.Ф. Оценка уровня загрязнения снежного покрова химическими соединениями и элементами на территории Шелеховского района в Восточной Сибири // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 12. С. 1443–1449. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449>. EDN: BPWYLC.
6. Филимонова Л.М., Паршин А.В., Бычинский В.А. Оценка загрязнения атмосферы в районе алюминиевого производства методом геохимической съемки снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 75–84. EDN: UYCNVJ.
7. Grebenschchikova V.I., Kuzmin M.I., Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Donskikh I.V., Doroshkov A.A. Chemical contamination of soil on urban territories with aluminum production in the Baikal region, Russia // Air, Soil and Water Research. 2021. Vol. 14. <https://doi.org/10.1177/11786221211004114>.
8. Асфандиярова Л.Р., Забиров Т.З., Байтимиров А.Р. Анализ состояния атмосферного воздуха при помощи мониторинга снежного и почвенного покрова // Решение. 2020. Т. 1. С. 62–64. EDN: HSUPQW.
9. Вологжина С.Ж., Сафонова Е.В. Оценка загрязнения атмосферного воздуха Южного Прибайкалья выбросами промышленных предприятий // Географический вестник. 2018. № 2. С. 128–138. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-128-138>. EDN: UUUEBY.
10. Холодова М.С., Просекин С.Н., Тирских Э.Н., Долгих П.Г. Особенности микроэлементного состава снегового покрова г. Усолье-Сибирское // Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, почетного члена Русского географического общества, профессора, доктора географических наук Земцова Алексея Анисимовича (г. Томск, 18–19 февраля 2020 г.). Томск: Изд-во ТГУ, 2020. С. 150–153. EDN: TYQZFN.
11. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Лопатина Д.Н., Янчук М.С. Загрязнение атмосферы и содержание фтора в снеге на акватории оз. Байкал // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 735. EDN: UZJITD.
12. Носова О.В., Каверзин А.В. Мониторинг снежного покрова селитебной зоны г. Норильска // Культура. Наука. Производство. 2019. № 4. С. 30–36. EDN: ZPFUYT.
13. Мищенко О.А., Шелганова А.А. Мониторинг состояния снежного покрова на территории Хабаровского края // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9. № 3. <https://doi.org/10.15862/11ECOR322>. EDN: QUVJWR.
14. Новорощкая А. Г. О результатах химического мониторинга снежного покрова Хабаровска // Успехи современного естествознания. 2018. № 12-2. С. 374–379. EDN: MLQEPRB.
15. Ломсков М.А., Коновалов А.М., Шурухт К.И. Мониторинг содержания тяжелых металлов в снежном покрове отдельных участков трех парковых территорий Москвы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 3. С. 27–29. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2022.03.23>. EDN: DJIKSU.
16. Качор О.Л., Сидоров И.М., Чайка Н.В., Шатрова А.С. Мониторинг загрязнений снежного покрова района МО «город Свирск» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10. С. 82–86. EDN: RGSXNR.
17. Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А. Динамика загрязнения снегового покрова микроэлементами в окрестностях тепловой электростанции (на примере Томской ГРЭС-2) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25. № 2. С. 44–53. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-2-44-53>. EDN: PPVUTJ.



18. Холодова М.С., Пастухов М.В., Бычинский В.А., Просекин С.Н., Белозерова О.Ю. Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова в различных функциональных зонах г. Усолье-Сибирское // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 9. С. 219–230. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3687>. EDN: IXLWDW.
19. Даунов Б.Я. Мониторинг загрязнения атмосферы и снежного покрова с целью предотвращения ЧС техногенного характера // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 159–161. EDN: YXLNIL.
20. 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: XMXYIB.
21. Parshin A. Ecological and geochemical features of ore-prospective geosystems in the Arctic part of eastern Eurasia // Arctic Ecological and Environment – Sentinel of Global Climate Change: International Arctic School, Harbin Institute of Technologies (Harbin, 22–26 July 2024). Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/390769261_ECOLOGICAL_AND_GEOCHEMICAL_FEATURES_OF_ORE-PROSPECTIVE_GEOSYSTEMS_IN_THE_ARCTIC_PART_OF_EASTERN_EURASIA (дата обращения: 05.03.2025).

References

1. Klyuev N.N., Yakovenko L.M. “Dirty” cities in Russia: factors determining air pollution. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018;26(2):237-250. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-2-237-250>. EDN: VODDOE.
2. Akhtimankina A.V. Air pollution caused by emissions of industrial enterprises of Irkutsk Region. *The bulletin of Irkutsk State University. Series: “Earth Sciences”*. 2017;26:15-27. (In Russ.). EDN: ZFPJUF.
3. Novikova S.A. Estimation of the level of air pollution in Irkutsk. *Natsional'nye priority Rossii*. 2019;1:50-56. (In Russ.). EDN: PDSWKT.
4. Prosekin S.N., Amosova A.A., Chubarov V.M., Bychinsky V.A. Assessment of the ecological and geochemical state of technogenously loaded suburban districts of Shelekhov and Irkutsk cities according to the data of snow geochemical monitoring. *Geosphere Research*. 2023;3:140-153. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/28/10>. EDN: JSGKSM.
5. Lisetskaya L.G., Shayakhmetov S.F. Assessment of the level of pollution of the snow cover with chemical compounds and elements in the territory of the Shelekhov district in Eastern Siberia. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(12):1443-1449. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449>. EDN: BPWYLC.
6. Filimonova L.M., Bychinskii V.A., Parshin A.V. Assessment of air pollution in the area of aluminum production by the method of geochemical survey of snow cover. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2015;10:75-84. (In Russ.). EDN: UYCNVJ.
7. Grebenschikova V.I., Kuzmin M.I., Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Donskikh I.V., Doroshkov A.A. Chemical contamination of soil on urban territories with aluminum production in the Baikal region, Russia. *Air, Soil and Water Research*. 2021;14. (In Russ.). <https://doi.org/10.1177/11786221211004114>.
8. Asfandiyarova L.R., Zabirov T.Z., Baitimirov A.R. Snow and soil cover monitoring-based analysis of atmospheric air conditions. *Reshenie*. 2020;1:62-64. (In Russ.). EDN: HSUPQW.
9. Vologzhina S.Zh., Safonova E.V. The assessment of air pollution of the Southern Baikal area by emissions of industrial enterprises. *Geographical Bulletin*. 2018;2:128-138. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-128-138>. EDN: UUUEBY.
10. Kholodova M.S., Prosekin S.N., Tirsikh E.N., Dolgikh P.G. Features of microelement composition of snow cover of city of Usolye-Sibirskoye. In: *Geomorfologiya i fizicheskaya geografiya Sibiri v XXI veke: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya zasluzhennogo rabotnika vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii, pochetnogo chlena Russkogo geograficheskogo obshchestva, professora, doktora geograficheskikh nauk Zemtsova Alekseya Anisimovicha = Geomorphology and physical geography of Siberia in the 21st century: materials of the global scientific and practical conference devoted to the 100th birth anniversary of the Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honorary Member of the Russian Geographical Society, Professor, Doctor of Geographic sciences Zemtsov Aleksey Anisimovich*. 18–19 February 2020, Tomsk. Tomsk: Tomsk State University; 2020, p. 150-153. (In Russ.). EDN: TYQZFN.
11. Belozertseva I.A., Vorobeva I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Yanchuk M.S. Pollution of an atmosphere and the maintenance of fluorine in a snow of lake Baikal water area. *Modern problems of science and education*. 2015;2-2:735. (In Russ.). EDN: UZJITD.
12. Nosova O. V., Kaverzin A.V. Monitoring of snow cover of the residential zone of the city of Norilsk. *Culture. Science. Production*. 2019;4:30-36. (In Russ.). EDN: ZPFUYT.
13. Mishchenko O.A., Shelganova A.A. Monitoring the state of snow cover in the Khabarovsk Territory. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2022;9(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/11ECOR322>. EDN: QUVJWR.
14. Novorotskaya A.G. On the results of chemical monitoring of snow cover of Khabarovsk. *Advances in Current Natural Sciences*. 2018;2:374-379. (In Russ.). EDN: MLQEPR.
15. Lomskov M.A., Konovalov A.M., Shurukht K.I. Monitoring of the content of heavy metals in the snow cover of individual sections of three park territories in Moscow. *Modern Science: Actual Problems of Theory And Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2022;3:27-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2022.03.23>. EDN: DJIKSU.



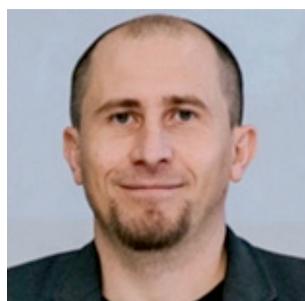
16. Kachor O., Sidorov I., Chaika N., Shatrova A. Snow cover pollution monitoring in "Town of Svinsk" municipal formation area. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2013;10:82-86. (In Russ.). EDN: RGSXNR.
17. Talovskaya A., Yazikov E., Filimonenko E. Dynamic of snow pollution by trace elements within thermal power plant (case study: Tomsk GRES-2). *Transbaikal State University Journal*. 2019;25(2):44-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-2-44-53>. EDN: PPVUTJ.
18. Kholodova M.S., Pastukhov M.V., Bychinsky V.A., Prosekin S.N., Belozerova O.Yu. Mineral and material composition of solid sediment of snow cover in various functional zones of Usolye-Sibirskoe. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(9):219-230. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3687>. EDN: IXLWDW.
19. Daunov B.Ya. Monitoring of atmospheric and snow cover pollution to prevent man-made emergencies. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstvii chrezvychainykh situatsii*. 2018;1:159-161. (In Russ.). EDN: YXLNIL.
20. 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.
21. Parshin A. Ecological and geochemical features of ore-prospective geosystems in the Arctic part of eastern Eurasia. In: *Arctic Ecological and Environment – Sentinel of Global Climate Change: International Arctic School, Harbin Institute of Technologies*. 22–26 July 2024, Harbin. Available from: https://www.researchgate.net/publication/390769261_ECOLOGICAL_AND_GEOCHEMICAL_FEATURES_OF_ORE-PROSPECTIVE_GEOSYSTEMS_IN_THE_ARCTIC_PART_OF_EASTERN_EURASIA [Accessed 5th March 2025].

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 the Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>



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>

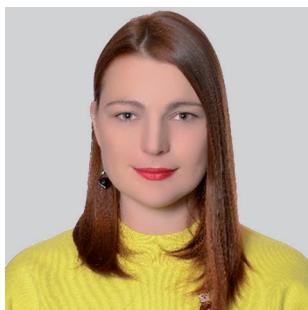
Alexander V. Parshin,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Director of the Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute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



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>



Трусова Валентина Валерьевна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник департамента геоэкологии,
институт «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,
vvtrusova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>
Valentina V. Trusova,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Geoecology Department,
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 of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
vvtrusova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>



Курина Анастасия Владимировна,
инженер-исследователь департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
kurinanaya@geo.istu.edu.
<https://orcid.org/0009-0001-0434-5642>
Anastasia V. Kurina,
Research Engineer of the Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
kurinanaya@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0001-0434-5642>

Вклад авторов / Contribution of the authors

О.Л. Качор – проведение исследования, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, написание черновика рукописи.

А.В. Паршин – разработка концепции, предоставление ресурсов, валидация результатов, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

З.Л. Икрамов – курирование данных, проведение исследования, разработка программного обеспечения, визуализация.



Б.В. Трусова – проведение исследования, валидация результатов, редактирование рукописи.

А.В. Курина – проведение исследования, валидация результатов, редактирование рукописи.

Olga L. Kachor – investigation, methodology, project administration, writing – original draft.

Alexander V. Parshin – conceptualization, resources, validation, writing – original draft, writing – editing.

Ziyoviddin L. Ikramov – data curation, investigation, software, visualization.

Valentina V. Trusova – investigation, validation, writing – editing.

Anastasia V. Kurina – investigation, validation, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Паршин А.В. является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2023 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Alexander V. Parshin has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2023, but he did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The authors do not report any other 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 07.03.2025; одобрена после рецензирования 14.03.2025; принята к публикации 21.03.2025.

The article was submitted 07.03.2025; approved after reviewing 14.03.2025; accepted for publication 21.03.2025.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.838.5:550.8.053:550.849:551.215.4:552.2

EDN: ALWXDW

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49



Петрофизические исследования магматических и метаморфических комплексов Ольхонского геодинамического полигона

К.М. Константинов^{a✉}, Е.В. Скляров^b, Л.Р. Косарева^c, А.В. Лавренчук^d,
 Е.В. Пушкарев^e, Г.К. Константинов^f, П.Н. Воробьева^g, А.Е. Дугарова^h,
 В.А. Пероваⁱ, Н.И. Пилипенко^j, Е.А. Сиселягин^k, Э.Б. Тулесонова^l

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

^bИнститут земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

^cКазанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

^dИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

^eНовосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^gИнститут геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварецкого Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

^{h,l}ООО «Сигма-Гео», Иркутск, Россия

Резюме. Целью исследования магматических и метаморфических комплексов Ольхонского региона являлась разработка петрофизической легенды для аэрокосмической геологической карты нового поколения как основы для интерпретации материалов геофизических съемок, геодинамических реконструкций и пр. Благодаря современной методике и оборудованию проведены полевые работы по отбору ориентированных образцов, лабораторные петрофизические и аналитические исследования. По рассмотренным объектам получены скалярные и векторные физические параметры (плотность, магнитная восприимчивость, векторы остаточной и суммарной намагниченности, коэффициент Кёнигсбергера), характеризующие их современное и древнее (палеомагнитное) состояние. Статистическая обработка первичных измерений показала, что изученные комплексы условно распадаются на два петромагнитных комплекса: слабо- и сильномагнитный. Поскольку базиты (долериты, габбро и беербахиты) второго петромагнитного комплекса могут оказаться перспективными объектами для геодинамических реконструкций, по ним были проведены рекогносцировочные геохимические, магнитоминералогические и палеомагнитные исследования. Основным минералом-носителем векторов естественной остаточной намагниченности в изученных образованиях является неизмененный магнетит ($Fe > 90\%$) с точкой Кюри около 580°C . В ходе проведенных в лабораторных условиях размагничиваний переменным магнитным полем и температурой рассмотренные геологические образования сохранили векторы характеристической естественной остаточной намагниченности, которые, возможно, будут использованы для палеогеодинамических реконструкций Ольхонского террейна.

Ключевые слова: Западное Прибайкалье, Ольхонский террейн, аэрокосмическая геологическая карта, петрофизическая легенда, ранний палеозой, магнетиты, палеомагнетизм

Финансирование: Работа выполнена в рамках проектной деятельности студентов Иркутского национального исследовательского технического университета 2023–2024 гг.

Для цитирования: Константинов К.М., Скляров Е.В., Косарева Л.Р., Лавренчук А.В., Пушкарев Е.В., Константинов Г.К. [и др.]. Петрофизические исследования магматических и метаморфических комплексов Ольхонского геодинамического полигона // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 24–49. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49>. EDN: ALWXDW.



GEOPHYSICS

Original article

Petrophysical studies of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon geodynamic polygon

Konstantin M. Konstantinov^a, Evgeny V. Sklyarov^b, Lina R. Kosareva^c,
Andrey V. Lavrenchuk^d, Evgeny V. Pushkarev^e, German K. Konstantinov^f,
Polina N. Vorobyeva^g, Ayana E. Dugarova^h, Veronika A. Perovaⁱ,
Nikolay I. Pilipenko^j, Egor A. Siselyatin^k, Erzhena B. Tulesonova^l

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

^bInstitute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^cKazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

^dV.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^dNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^eZavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

^{h,i}Sigma-Geo LLC, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon region is to develop a petrophysical legend for a new generation aerospace geological map as a basis for interpreting geophysical survey materials, geodynamic reconstructions, etc. Using modern methods and equipment, field work was carried out to select oriented samples, conduct laboratory petrophysical and analytical studies. Scalar and vector physical parameters (density, magnetic susceptibility, vectors of remanent and total magnetisation, Königsberger coefficient) characterising modern and ancient (paleomagnetic) state of the objects under investigation were obtained. Statistical processing of the primary measurements showed that the studied complexes are conditionally divided into two petromagnetic complexes: weakly and strongly magnetic. Since the basites (dolerites, gabbros and beerbachites) of the second petromagnetic complex may prove to be promising objects for geodynamic reconstructions, they were subjected to reconnaissance geochemical, magnetomineralogical and paleomagnetic surveys. Unaltered magnetite ($Fe > 90\%$) with a Curie point of about 580°C is found to be the main mineral-carrier of natural remanent magnetization vectors in the studied formations. In the course of laboratory demagnetisations by alternating magnetic field and temperature, the considered geological formations retained the vectors of characteristic natural remanent magnetization, which can be used for paleogeodynamic reconstructions of the Olkhon terrane.

Keywords: Western Baikal region, Olkhon terrane, aerospace geological map, petrophysical legend, Early Paleozoic, magnetites, paleomagnetism

Funding: The work was carried out within the framework of the project activities of students of the Irkutsk National Research Technical University in the period from 2023 to 2024.

For citation: Konstantinov K.M., Sklyarov E.V., Kosareva L.R., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Konstantinov G.K., et al. Petrophysical studies of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon geodynamic polygon. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):24-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49>. EDN: ALWXDW.

Введение

Ольхонский регион был выбран в качестве геодинамического полигона, в пределах которого предлагалось обсудить перспективы отличной от прежней интерпретации массива новых накопленных геологических данных, кардинально изменивших представления о геологии и тектонике Западного Прибайкалья (рис. 1)¹. Ольхонский регион занимает клю-

чевую позицию в системе основных структур Азии – здесь проходит граница между Сибирским кратоном и Центрально-Азиатским складчатым поясом, выяснение истории взаимодействия которых во времени и пространстве представляется интересной и актуальной задачей.

В процессе работы стало очевидно, что без геологической карты, которая отражала

¹Скляров Е.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Лавренчук А.В. [и др.]. Аэрокосмическая геологическая карта юго-западной части Ольхонского региона (Байкал). Зона Крестовский – Широкая. Ольхонский геодинамический полигон. М.: Группа компаний А1TIS, 2012.

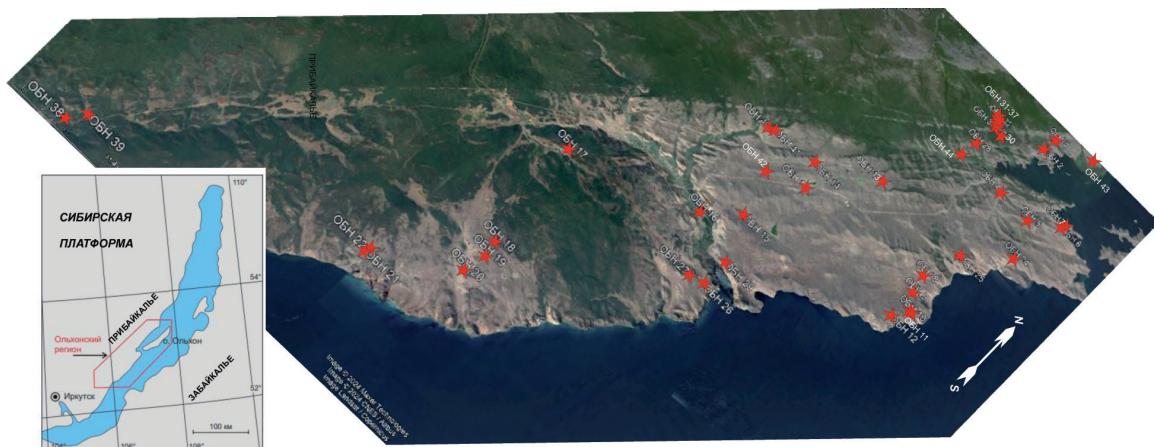


Рис. 1. Схема расположения изученных обнажений Ольхонского региона Западного Прибайкалья

Красными звездочками на карте обозначены обнажения с указанием номера

Fig. 1. Schematic map of the studied outcrops in the Olkhon area of the Western Baikal region

The red stars on the map indicate the outcrops with specified numbers

бы реальный образ коллизионной системы, вскрытой здесь в современном срезе, дальнейшее продвижение в исследованиях вряд ли возможно. С этой целью для Ольхонского региона была составлена аэрокосмическая геологическая карта (Байкал, Россия) масштаба 1:40000 [1]². Стоит отметить, что непрерывно поступающий новый полевой геологический и аналитический материал заставляет вносить в нее серьезные корректизы, нередко касающиеся в том числе базовых представлений.

Несмотря на то что панхроматические и мультиспектральные космические снимки со спутников GeoEye-1, WORLD VIEW-2, QUICK BIRD-2, IKONOS-2 достаточно четко отражают детали геологического строения масштаба 1:1500–1:5000, помочь в решении данной проблемы оказывают и материалы геофизических съемок. В последнее время на отдельных участках Ольхонского региона ведутся опытно-методические геофизические исследования по районированию территории силами института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета, Института земной коры СО РАН и ООО «Сигма-Гео».

Основным продуктом геофизического районирования является карта³. Под петрофизическим картированием мы понимаем сочета-

ние методов (скважинных, наземных, морских и дистанционных) геофизических съемок (телефизическая информация о площадном распределении физических масс) с площадными геологическими данными и исследованиями физических свойств горных пород района. Ключом к дешифрированию указанной карты служит петрофизическая легенда, атрибутами которой являются петрофизические таксоны⁴. Таким образом, составленная в ходе петрофизических исследований карта отражает пространственное распределение петрофизических таксонов различных геологических эпох, генетических типов, составов минералов (порообразующих и акцессорных), влияющих на особенности их современных физических свойств: объемной плотности – σ , магнитной восприимчивости – α , векторов естественной остаточной намагниченности – In , удельного электрического сопротивления – ρ , естественной радиоактивности и др.

Другая важная составляющая, помимо петрофизического картирования, связана с необходимостью изучения палеомагнетизма некоторых осадочных, магматических и метаморфических комплексов Ольхонского террейна в качестве его количественной характеристики для геодинамических реконструкций. Решение перечисленных проблем предусматривает отбор ориентированных образцов.

² Федоровский В.С., Скляров Е.В., Мазукаев А.М., Котов А.Б., Каргополов С.А., Лавренчук А.В. [и др.]. Геологическая карта массива Тажеран (Байкал). Масштаб 1:100000. М.: Группа компаний A1TIS, 2009.

³ Петрофизика: справочник. В 3 кн. Кн. 2. Техника и методика исследований / под ред. А.А. Молчанова, Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 256 с.

⁴ Константинов К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Вилуйской и Тунгусской синеклизы Сибирской платформы: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2014. 34 с.



В период с 1958 по 1968 г. под руководством М.Р. Новосёловой (1959 г.), Ю.П. Осиновского (1963 г.), В.Т. Кардаш (1964, 1965, 1968 гг.), А.М. Корнейчука (1965 г.), Ю.К. Журавлёва (1963 г.) и других исследователей было изучено около 10000 образцов разных геологических образований Ольхонского региона [2], для основной массы которых определены плотность и магнитная восприимчивость. Лишь для трехсот неориентированных (!) образцов был измерен модуль естественной остаточной намагниченности. В результате анализа полученного фактического материала были сделаны следующие выводы:

1. Точки отбора образцов размещаются неравномерно, а полученные петрофизические данные по ряду петрофизических таксонов статистически не представительны.

2. Отсутствие ориентированных образцов не позволяет изучать тензорные и векторные физические параметры (например, анизотропию магнитной восприимчивости, векторы естественной остаточной, индуктивной l_i и суммарной l_s намагниченностей), что делает невозможным их использование для физико-геологического моделирования, палеомагнитных реконструкций и т. п.

3. Статистическая обработка результатов петрофизических измерений выполнена некорректно, что может отрицательно повлиять на результаты интерпретации материалов геофизических съемок при решении обратных задач (построение физико-геологических моделей).

4. Изученные горные породы нуждаются в пересмотре и уточнении их состава, строения, возраста и прочей информации для формирования современной петрофизической легенды.

Таким образом, актуальность петрофизических исследований горных пород Ольхонского региона заключается в повышении достоверности аэрокосмической геологической карты как основы геодинамических реконструкций террейнов Центрально-Азиатского пояса с помощью комплекса геофизических методов. В связи с высокой востребованностью материалов по физическим свойствам горных пород целью проведенных работ являлась разработка петрофизической легенды нового поколения, опирающейся на современную геологическую основу и корректную

петрофизическую, палеомагнитную фактографию. На данном этапе перед исследователями стояли три основные задачи.

1. Отбор ориентированных образцов из важных для петрофизического картирования петрофизических таксонов.

2. Проведение первичных лабораторных измерений и лабораторных исследований (петро- и палеомагнитных, петрографических, аналитических и пр.).

3. Корректная статистическая обработка полученных результатов и составление варианта петрофизической легенды (таблица дескриптивных значений петрофизических параметров).

Материалы и методы исследования

Первые геологические исследования Ольхонского региона проводились Д.Г. Мессершмидтом, И.Г. Георги, Г.Ф. Миллером, И.Г. Гмелиным, Г.В. Стеллером, П.С. Палласом начиная с первой половины XVIII в. Систематическое описание геологии региона дали И.Д. Черский (1886 г.) и В.А. Обручев (1890 г.), определившие принадлежность метаморфических толщ побережья Байкала к архею [3]. Поисковые и геолого-съемочные работы на территории развернулись в XX в. под научным руководством Б.Н. Артемьева, Л.И. Салопа, В.Д. Маца, С.М. Замараева, А.П. Кочнева, Е.В. Павловского и др. [4 и др.]. С конца 1950-х гг. по 1960 г. на территории Западного Прибайкалья проводились аэромагнитная и гравиметрическая съемки масштаба 1:1000000 и крупнее [2, 5 и др.].

Новый этап изучения Ольхонского региона связан с именем Валентина Сергеевича Федоровского, который привлек к исследованиям геологов из Москвы, Ленинграда, Новосибирска, Иркутска. Синтез новых данных, полученных за тридцать с лишним лет, позволил создать аэрокосмическую геологическую карту масштаба 1:40000 (Байкал, Россия) [1], которая и является основой для формирования современной петрофизической легенды.

Приольхонье, для территории которого планировалась разработка петрофизической легенды, является уникальным геодинамическим полигоном⁵, где на современном эрози-

⁵ Тектоника юга Восточной Сибири. (Объяснительная записка к тектонической карте юга Восточной Сибири масштаба 1:1500000) / сост.: А.П. Таскин, Г.Л. Митрофанов, Ф.В. Никольский, Т.В. Мордовская. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГиМС, 1987. 104 с.



онном срезе наблюдаются выходы мантийных и нижнекоровых пород, структур фундамента Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса. Граница Ольхонского террейна (раннепалеозойский коллизионный шов – Приморский разлом, представленный разнообразными бластомилонитами) с Сибирским кратоном выражена в виде эскарпа, протягивающегося на несколько сотен километров в северо-восточном направлении, наблюдавшегося с большинства возвышенностей территории, и отчетливо видна на аэро- и космоснимках [1].

Ольхонский композитный террейн (рис. 2) является гетерогенной структурой и представляет собой коллаж отдельных блоков, отличающихся друг от друга по составу пород, степени метаморфической переработки, возрасту и геодинамическим условиям их образования [6–9]. В его строении участвуют более 200 тектонических единиц, в том числе 4 субтеррейна и 5 экзотических микротеррейнов. Интегральная структура может быть определена как

синметаморфический коллизионный коллаж, представленный сложным комплексом разнообразных магматических и метаморфических пород. Среди последних преобладают гнейсы и гранитогнейсы, широким распространением пользуются мраморы и амфиболиты. Магматические комплексы представлены многочисленными жилами, изредка – небольшими массивами гранитоидов, разноразмерными телами основных и ультраосновных пород. При первом приближении в террейне можно выделить две части: северную, преимущественно гнейсово-карбонатную, и южную, преимущественно вулканогенно-карбонатную.

С начала ХХI в. по территории Ольхонского региона⁶ получено множество геохронологических данных (см. рис. 2) [9–14 и др.], установлен кембрийский возраст дометаморфических субщелочных габброидов и их субвулканических комагматов (500 млн лет, уран-свинцовый изохронный метод, циркон) и два пика регионального метаморфизма – около 500 и 460–470 млн лет [15]. Указанные пики

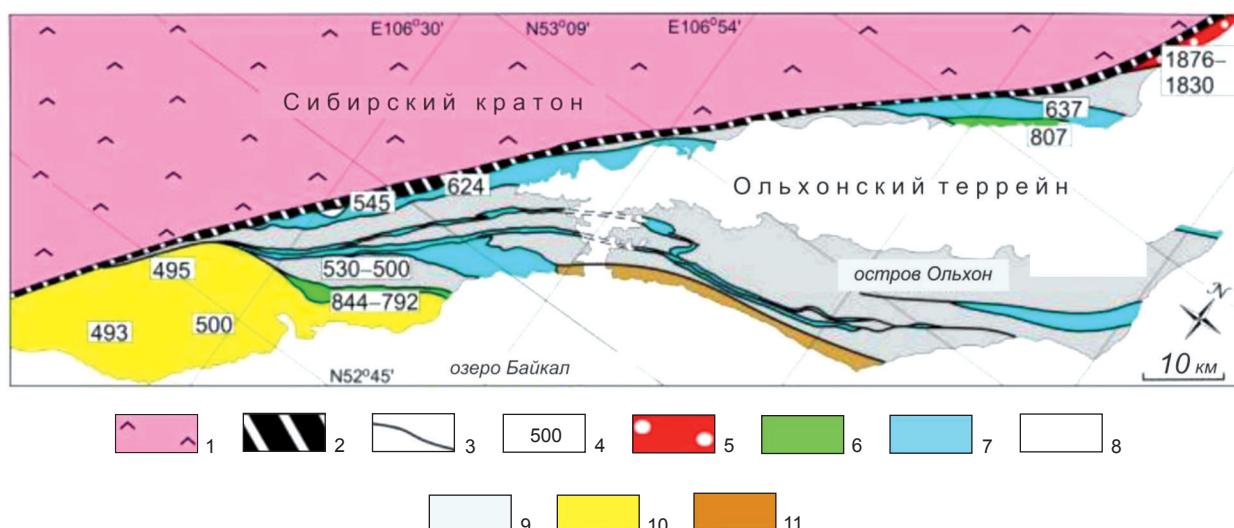


Рис. 2. Упрощенная геодинамика Ольхонского террейна (согласно источнику [9] с переводом авторов):

(согласно источнику [5] с переводом авторов).
 1 – Сибирский кратон; 2 – палеозойский коллизионный шов; 3 – сдвиговые зоны;
 4 – возраст протолита (уран-свинцовый метод, циркон), млн лет; 5–11 – Ольхонский террейн:
 5 – палеопротерозойский срез, 6 – тонийская активная континентальная окраина, или коллизионная

истема, 7 – Эдиакарская остроневная дуга, 8 – Эдиакарский/Кембрийский океанический остров (гайот

9 – Кембрийский бассейн задней коры микроконтинента, 10 – Кембрийская зрелая островная дуга, или надсубдукционная аккреционная система, 11 – ордовикская аккреционно-коллизионная система
Fig. 2. Simplified geodynamics of the Olkhon terrane (according to source [9] in authors' translation):
 1 – Siberian craton; 2 – paleozoic collisional suture; 3 – shear zones; 4 – protolith age (uranium-lead method, zircon), million years; 5–11 – Olkhon terrane: 5 – paleoproterozoic section, 6 – tonian active continental margin or collision system, 7 – Ediacaran island arc, 8 – Ediacaran/Cambrian oceanic island (guyot), 9 – Cambrian basin of the back crust of the microcontinent, 10 – Cambrian mature island arc, or suprasubduction accretion system, 11 – ordovician accretion-collision system

⁶ Федоровский В.С. Геологическая карта Юго-западной части Ольхонского региона. М.: Изд-во ГИН РАН, 2004.



достаточно уверенно фиксируют два основных тектономагматических события в истории геологического развития Ольхонского региона, приведших к формированию структуры Ольхонского террейна. Первое отвечает причленению Ольхонского террейна к Сибирскому кратону и проявлению раннего покровного тектогенеза, который сопровождался метаморфическими событиями (500–485 млн лет). Второе масштабное тектономагматическое событие фиксирует процессы сдвигового тектогенеза, метаморфизма амфиболитовой фации и внедрения разнообразных по составу синтектонических интрузий основного и кислого составов (470–460 млн лет).

В раннем палеозое все геологические события в Западном Прибайкалье связаны с формированием Ольхонской коллизионной системы [9, 12–14, 16–22 и др.]. Ольхонский композитный террейн Центрально-Азиатского складчатого пояса является одним из террейнов раннепалеозойского Прибайкальского коллизионного пояса, который сформировался вдоль южной границы Сибирского кратона на начальных стадиях закрытия Палеоазиатского океана в его северной части за счет причленения различных по возрасту и геодинамической природе террейнов к окраине кратона (рис. 3, б). Согласно палеомагнитным данным⁷, в этот период времени Сибирский кратон располагался в экваториальном поясе северного полушария и смешался к Северному полюсу, а его современная южная граница являлась фронтальной, к которой на протяжении неопротерозоя – раннего палеозоя «причаливали» разнообразные тектоностратиграфические экзотические блоки в результате закрытия Палеоазиатского океана (рис. 3, а). Близкий к современному облик генеральных геологических структур Байкальской горной области сформировался в конце позднего палеозоя.

Поскольку в строении Ольхонского террейна участвует большое количество разнообразных горных пород, в первую очередь для петромагнитных исследований были выбраны широко представленные в регионе магматические комплексы базитового состава. Пристальное внимание было уделено габброидам, а также вулканическим и субвулканично-

ским образованиям, представленным амфиболитами и беербахитами.

В пределах террейна (см. рис. 1 и 2) в настоящее время выделено четыре разновозрастных комплекса габброидов: Танхан, Тонта, бирхинский и усть-крестовский. К наиболее древним относятся офиолитовые габброиды комплекса Танхан [23]. Возраст офиолитов предположительно неопротерозойский. Были опробованы массивы Тогот (обнажения 23-6, 23-7)⁸, Танхан (обнажение 23-24), Оргойта (обнажение 23-25) и два небольших тела без названия (обнажения 23-13, 23-14).

Габброиды комплекса Тонта слагают несколько десятков мелких тел среди мраморов, гнейсов и кристаллических сланцев (обнажения 23-40 и 23-41), наиболее крупным является массив Улан-Харгана, который и был опробован (обнажения 24-47, 24-48 и 24-49). Предполагаемый возраст – кембрий.

Бирхинский габброидный комплекс представлен несколькими крупными массивами, из которых были опробованы собственно Бирхинский (обнажения 23-16, 23-17 и 23-27) и Крестовский (обнажения 23-21, 23-22) массивы. Возраст габброидов – 500 млн лет [24].

Субщелочные габброиды усть-крестовского комплекса были опробованы в пределах одноименного (обнажения 23-38, 23-39) и Тажеранского (обнажения 23-8 и 23-10) массивов. В последнем также были взяты пробы из нефелиновых и щелочных сиенитов (обнажения 24-51 и 24-53). Возраст габброидов составляет 460–470 млн лет [21, 24]. К этому же комплексу были отнесены своеобразные фасцитовые габбро (обнажения 23-19 и 23-21), слагающие серию мелких тел в обрамлении Усть-Крестовского массива [25]. Их возраст – 485 млн лет.

Кроме этого, были опробованы беербахиты (обнажения 23-11 и 23-23) и разнообразные амфиболиты (обнажение 23-14). Возраст беербахитов (продуктов автометаморфизма субвулканических тел) составляет 470 млн лет [22, 26]. Амфиболиты считались ранее метаморфизованными вулканитами в вулканогенно-осадочных сериях, однако более поздние исследования показали, что они могут являться линеаризированными в про-

⁷ Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.

⁸ Число обнажения указывает: год отбора-порядковый номер.



цессе сдвигового тектогенеза офиолитовыми габбро, а также метаморфизованными силлами и дайками.

Отобрана единственная дайка базитов (обнажение 24-60), прорывающая под косым углом сланцеватость бластомилонитов кол-

лизионного шва протяженностью около 2 км с мощностью 1–5 м [27].

Методика комплексных исследований петрофизических таксонов Ольхонского региона с целью формирования петрофизической легенды предусматривала:

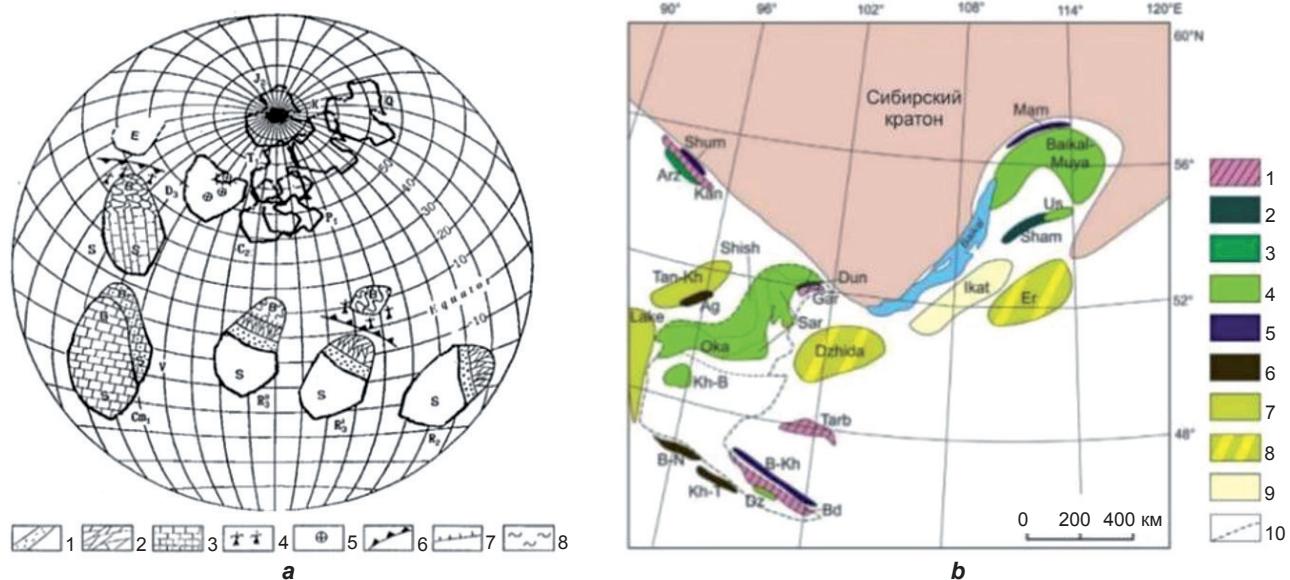


Рис. 3. Схемы геодинамического развития горно-складчатого обрамления юга Сибирского кратона в риффе – среднем палеозое (согласно источнику [9] с переводом авторов):

a – палинспастическая реконструкция перемещения Сибирского кратона в позднем докембрии–фанерозое: 1 – Прото-Байкало-Патомский линеамент; 2 – подводные конусы выноса;

3 – терригенно-карбонатные и карбонатные осадки венда – раннего палеозоя; 4 – островные дуги;

5 – внутриплитный магматизм; 6 – зоны субдукции;

7 – швы столкновения континентальных блоков; 8 – складчатые зоны

S – Сибирская платформа, микроконтиненты; В – Баргузинский; Е – Еравнинский

b – докембрейские блоки земной коры и неопротерозойско-кембрийские супра-субдукционные сборки в северной части Центрально-Азиатского складчатого пояса: 1 – блоки докембрийской земной коры;

2 – стениан-тонинские (около 1050–900 млн лет назад) офиолиты; 3 – стениан-тонинские

(около 1050–900 млн лет назад) океанические комплексы островных дуг; 4 – тонинские (около 850–750 млн лет назад) надсубдукционные комплексы; 5 – криогенно-эдиакарские

(около 680–600 млн лет назад) офиолиты и комплексы океанических островных дуг;

6 – эдиакарско-раннекембрийские (около 580–520 млн лет назад) офиолиты; 7 – эдиакарско-раннекембрийские (около 580–520 млн лет назад) океанические комплексы островных дуг;

8 – эдиакарско-раннекембрийские (около 580–520 млн лет назад) – кембрийские (около 520–490 млн лет назад) комплексы островных дуг;

9 – Эдиакарско-раннекембрийский (около 580–520 млн лет назад) задуговой бассейн;

10 – контуры Дзаванского и Тувино-Монгольского микроконтинентов

Блоки докембрийской земной коры:

Bd – Байдраг; Tarb – Тарбагатай; Gar – Гарган; Kan – Кан

Стениан-Тонинские (1050–900 млн лет назад) комплексы:

Dun – дунжугурский офиолит; Sham – шаманские офиолиты; Arz – Арзыбейская островная дуга

Тонийские (850–750 млн лет назад) комплексы: Dz – Дзаванская активная окраина, или континентальный

рифт; Kh-B – Холбонурская островная дуга; Oka – Окинская аккреционная призма;

Shish – шишихидские офиолиты; Sar – Сархойская активная окраина; Us – Усой, островная дуга;

Baikal-Muya – Байкало-Муйская активная окраина

Криогенно-эдиакарские (680–600 млн лет назад) комплексы:

B-Kh – баянхонгорские офиолиты; Mat – мамаканские офиолиты; Shum – Шумихинская островная дуга

Эдиакарско-раннекембрийские (580–520 млн лет назад) комплексы:

B-N – баяннурские офиолиты; Kh-T – Хан-Тайширские офиолиты; Ag – агардаг-нес-хемские офиолиты;

Lake – Озерная островная дуга; Tan-Kh – Таннууль-Хамсаринская островная дуга

Эдиакарско-раннедокембрийские (580–520 млн лет назад) – кембрийские (520–490 млн лет назад) комплексы:

Dzhida – Джидинская островная дуга; Er – Еравнинская островная дуга; Ikat – Икатский задуговый бассейн



Fig. 3. Diagrams of geodynamic development of the folded mountain framework of the southern Siberian craton in the Riphean – Middle Paleozoic (according to the source [9] in authors' translation):

a – palinspastic reconstruction of Siberian craton movement in the Late Precambrian–Phanerozoic:
1 – Proto-Baikal-Patom lineament; 2 – abyssal fans; 3 – terrigenous-carbonate and carbonate sediments of the vendian – early paleozoic; 4 – island arcs; 5 – intraplate magmatism; 6 – subduction zones;
7 – continental block collision sutures; 8 – folded zones

S – Siberian platform, microcontinents; B – Barguzinsky; E – Eravninsky

b – precambrian crustal blocks and neoproterozoic-cambrian supra-subduction assemblages in the northern part of the Central Asian Folded Belt: 1 – precambrian crustal blocks; 2 – stenian-tonian (ca. 1050–900 million years ago) ophiolites; 3 – stenian-tonian (ca. 1050–900 million years ago) oceanic complexes of island arcs; 4 – tonian (ca. 850–750 million years ago) suprasubduction complexes; 5 – cryogenian-ediacaran (ca. 680–600 million years ago) ophiolites and oceanic islandarc complexes; 6 – ediacaran-early cambrian (ca. 580–520 million years ago) ophiolites; 7 – ediacaran-early cambrian (ca. 580–520 million years ago) oceanic island arc complexes; 8 – ediacaran-early cambrian (about 580–520 million years ago) – cambrian (about 520–490 million years ago) island arc complexes; 9 – Ediacaran-Early Cambrian (about 580–520 million years ago) back-arc basin; 10 – contours of the Dzavan and Tuva-Mongolian microcontinents

Blocks of the Precambrian crust:

Bd – Baidrag; Tarb – Tarbagatai; Gar – Gargan; Kan – Kan Stenian-Tonian (1050–900 million years ago) complexes:
Dun – dunzhugur ophiolite; Sham – shaman ophiolites; Arz – Arzybey island arc Tonian (850–750 million years ago) complexes:
Dz – Dzavan active margin, or continental rift; Kh-B – Kholbonur island arc; Oka – Oka accretionary prism;
Shish – shishkhid ophiolites; Sar – Sarkhoy active margin; Us – Usui, island arc;
Baikal-Muya – Baikal-Muya active margin

Cryogenian-Ediacaran (680–600 million years ago) complexes:
Kh – bayankhongor ophiolites; Mam – mamakan ophiolites; Shum – Shumikhinskaya island arc Ediacaran-Early Cambrian (580–520 million years ago) complexes:
B-N – bayannur ophiolites; Kh-T – Khan-Tayshir ophiolites; Ag – agardag-nes-khem ophiolites;
Lake – Lake island arc; Tan-Kh – Tannuol-Khamsara island arc

Ediacaran-early precambrian (580–520 million years ago) – cambrian (520–490 million years ago) complexes:
Dzhida – Dzhida island arc; Er – Eravninskaya island arc; Ikat – Ikat back-arc basin

- отбор ориентированных образцов (штук) из естественных обнажений и строительных карьеров (см. рис. 1);
- пробоподготовку (изготовление кубиков с ребром 20 мм, шлифов, порошков и пр.);
- первичные измерения объемной плотности, магнитной восприимчивости и векторов естественной остаточной намагниченности;
- магнито-минералогические анализы по изучению петрографического и минералогического состава, гистерезисных параметров и точек Кюри Θ минералов ферримагнитной фракции;
- рекогносцировочное изучение компонентного состава векторов естественной остаточной намагниченности и выделение характеристической компоненты In^{ch} [28].

Отбор ориентированных образцов проведен по общепринятой методике⁹ из около 60 обнажений (см. рис. 1) в современной системе координат. В среднем из одного обнажения отби-

ралось 5 штуков, что составило более 300 шт. Из каждого штупфа выпиливалось по три кубика с ребром 20 мм, что в общей сложности составило около 1000 кубиков. Комплекс проведенных исследований петрофизических таксонов Ольхонского региона включал:

1. Петрофизические исследования, характеризующие гравитационное и магнитное состояния горных пород в месте их нахождения¹⁰. На данном этапе проходило изучение объемной плотности σ , магнитной восприимчивости α , векторов остаточной In , индуктивной $li = \alpha H$ (где H – вектор напряженности магнитного поля Земли в районе работ) и суммарной $ls = li + In$ намагниченостей, от которых зависит тип наблюденного (аномального и локального) магнитного поля. В свою очередь, векторы намагниченности (In , li или ls) определяются в пространстве тремя составляющими: величиной (соответственно In , li и ls), склонением ($0 < D < 360^\circ$) и наклонением ($-90^\circ < J < 90^\circ$). Отношение In/li

⁹ Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология / под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.

¹⁰ Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Л.: Недра, 1979. 351 с.



характеризует коэффициент Кёнигсбергера (фактор Q).

2. Аналитические (геохимические, петро-графические) исследования, которые проводились в Институте земной коры СО РАН и в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск). Благодаря использованию сканирующего электронного микроскопа (СЭМ-ЭДС)¹¹ были получены изображения исследуемой поверхности в обратно рассеянных электронах и химический состав минералов в точке. Условия работы: режим высокого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ, расстояние – 15 мм.

3. Дополнительно к аналитическим исследованиям химического состава минералов ферримагнитной фракции, а также с целью установления природы векторов естественной остаточной намагченности были проведены и магнито-минералогические исследования – магнито-структурный и терромагнитный анализы в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Магнито-структурный анализ был проведен с целью определения таких гистерезисных параметров ферримагнитных минералов габбро и беербахитов, как значения удельного магнитного момента насыщения J_s , коэрцитивной силы B_c по кривой индуктивной намагченности и значения удельного магнитного момента остаточного насыщения J_{rs} , а также разрушающего ее поля B_{cr} [29, 30], диа-/парамагнитная, ферромагнитная и суперпарамагнитная компоненты магнитной восприимчивости α_p , α_f , α_{sp} [31].

Терромагнитный анализ позволяет определять компонентный химический состав ферримагнетиков по точкам Кюри на графиках зависимости $l_i = f(T)$ [32]. Проведение терромагнитных исследований осуществлялось при помощи экспрессных весов Кюри, которые позволяют измерять зависимость индуктивной намагченности в поле до 0,2 Тл от температуры (до 800 °С) при скорости нагрева 100 °С/мин.

4. Проведены палеомагнитные исследования по изучению компонентного состава векторов естественной остаточной намагченности горных пород [28]. Опыты были выполнены в институте «Сибирская школа

геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета и Институте земной коры СО РАН. Образцы подвергались лабораторным экспериментам по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой.

При проведении петро- и палеомагнитных исследований учитывались отечественные и зарубежные методические разработки по графической и аналитической реализации решений петро- и палеомагнитных задач с использованием компьютерных программ Statistica-6 [33], Enkin-96 [34], PetroStat [35] и др.

Вышеперечисленные исследования были проведены с помощью такого современного оборудования, как:

- СЭМ TESCAN MIRA 3 LMU, оснащенный энергодисперсионными спектрометрами с системой микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 с безазотным детектором (Oxford Instruments Analytical Limited, Англия);

- измерители магнитной восприимчивости α (KLY-3s и MFK1-FA, Advanced Geoscience Instruments Company, Чехия);

- спин-магнитометры для измерения векторов естественной остаточной намагченности (JR-6, Advanced Geoscience Instruments Company, Чехия);

- размагничивающие установки переменным магнитным полем (AF-Demagnetizer, Molspin Limited, Великобритания);

- вибро-магнитометры и измерители магнитной фракции (Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия) и др.

Результаты исследований и их обсуждение

Распределение физических параметров изученных петрофизических таксонов (табл. 1, рис. 4) достаточно неравномерное, что объясняется разнообразным минералогическим составом. Закону нормального распределения в некоторой степени подчиняется объемная плотность, которая варьируется в пределах от 2500 до 3600 кг/м³. Примерно 75 % изученных образцов характеризуется средней плотностью от 2800 до 3100 кг/м³. Относительно повышенная плотность (до 3600 кг/м³) установлена в габброидах и долеритах (в том числе постколлизионных).

¹¹ Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 232 с



Таблица 1. Дескриптивные значения физических параметров петрофизических таксонов Ольхонского региона
Table 1. Descriptive values of Olkhon region petrophysical taxa physical parameters

Номер обнаружения	Типы пород	N	$\sigma, \text{кг/м}^3$		$\varrho, 10^{-5} \text{ см}$		$l, 10^{-3} \text{ А/м}$		$ln, 10^{-3} \text{ А/м}$		Q, ед.		$I_s, 10^{-3} \text{ А/м}$		ϵ		D	J	α_{95}				
			σ	s	n	ϱ	e	l, l	e	ln	e	D	J	α_{95}	Q	ϵ	I_s	ϵ	D	J	α_{95}		
23-1	Амфиболиты	5	2859,0	35,3	16	51	1,01	25	1,01	3	1,19	40	30	3,5	23,2	0,12	1,19	27	1,02	7	70	117,4	3,4
23-2	Амфиболиты	5	2804,2	49,7	11	68	1,16	33	1,16	70	1,79	280	68	2,8	33,5	2,13	1,6	120	1,45	298	73	10,9	14,5
23-3	Амфиболиты	5	2814,6	31,5	14	99	1,27	48	1,27	11	1,54	165	31	1,6	49,2	0,23	1,58	66	1,25	32	84	5,4	19
23-4	Метагаббро	5	2943,8	55,0	16	70	1,03	34	1,03	0,9	1,33	0	54	3,94	21,4	0,03	1,3	35	1,04	355	73	9504	0,4
23-5	Амфиболиты	5	2882,7	28,0	14	37	1,03	18	1,03	0,3	1,27	55	52	2,2	35,9	0,02	1,27	18	1,03	357	73	2963	0,7
23-6	Долериты	5	3067,2	6,1	15	62	1,01	30	1,01	0,5	1,2	160	7	2,14	35,4	0,02	1,21	30	1,01	356	74	5818	0,5
23-7	Троктолиты	5	2917,4	45,1	16	25	1,04	12	1,04	0,9	1,18	287	44	1,5	52,2	0,07	1,16	13	1,04	351	73	357,9	2,0
23-8	Метагаббро	5	2930,2	23,8	15	53	1,01	25	1,01	0,1	1,16	39	8	1,2	76,3	0,01	1,16	26	1,01	355	73	60164	0,2
23-9	Амфиболиты	5	2886,9	94,5	12	35	1,03	17	1,03	0,3	1,36	66	-1	1,3	73,1	0,01	1,38	17	1,03	351	73	698,4	1,6
23-10	Габбро, массив Тажеран	5	2984,0	54,8	16	10700	1,04	5190	1,04	960	1,16	13,6	14,4	8,6	13,4	0,18	1,18	5838	1,03	3,5	65	203	2,6
23-11	Беербахит, массив Тажеран	5	3157,12	27,2	16	2914	1,16	1413	1,16	1729	1,7	78	55	1,7	44,6	1,22	1,55	3743	1,38	40	71	3,16	25,0
23-12	Трахидолериты, массив Тажеран	5	3144,0	78,0	17	702	1,19	341	1,19	2028	1,58	69	27	1,4	55,0	5,95	1,45	2357	1,52	53	56	1,76	40,2
23-13	Метагаббро	5	3104,2	109,7	14	58	1,1	28	1,1	25	1,8	52	-9	4,5	21,0	0,89	1,69	63	1,32	48	34	3,7	24,1
23-14	Гранатовые амфиболиты	5	3006,1	103,6	16	77	1,02	37	1,02	0,7	1,29	88	-11	2,68	28,2	0,02	1,3	37	1,02	0	72	975,6	1,12
23-15	Амфиболиты Габбро, полоса	5	2973,2	31,1	14	43	1,02	21	1,02	1,15	1,62	155	-39	1,7	46,5	0,05	1,64	22	1,1	326	75	7	16,2
23-16	Уланнурская	5	2845,3	198,4	15	52	1,03	25	1,03	2	1,56	54	-7	2,12	35,7	0,06	1,54	26	1,04	11	73	96,1	3,9
23-17а	Мрамор, карьер Нарин Кунта	2	2663,2	*	7	5	1,13	3	1,13	0,2	1,27	55	-65	1,8	64,6	0,07	1,22	3	1,14	356	73	602,7	2,5
23-17б	Габбро, карьер Нарин Кунта	4	2893,3	134,1	13	54	1,03	26	1,03	0,4	1,18	24	38	1,9	43,9	0,01	1,18	26	1,03	355	73	19478	0,3
23-18	Амфиболиты	6	2875,5	63,3	14	147	1,24	71	1,24	24	1,84	304	42	1,5	54,2	0,34	1,65	118	1,43	313	70	4,7	20,6



23-19а	Фассалитовые габбро	2	3110,3	*	8	43	1,01	21	1,01	2	1,59	279	-61	1,7	63,7	0,11	1,58	18	1,05	335	78	54,8	7,5
23-19б	Фассалитовые габбро	1	2812,3	*	3	1326	1,28	643	1,28	105	1,16	27	-9	46,1	18,4	0,16	1,1	660	1,29	6	65	1207	3,5
23-20а	Монцогаббро	2	2991,4	*	6	85	1,22	42	1,22	52	1,18	123	31	8,1	25,1	1,24	1,35	81	1,14	109	56	7,9	25,4
23-20б	Монцогаббро	3	2905,4	*	14	1346	1,08	653	1,08	656	1,39	288	66	4,3	21,7	1,00	1,3	1362	1,18	297	72	21,4	8,8
23-20	Монцогаббро	5	2923,31	71,3	20	589	1,35	286	1,35	304	1,42	196	85	2,67	25,07	1,07	1,22	584	1,38	317	86	6,8	13,5
23-21а	Фассалитовые габбро, массив Крестовский	1	3333,5	*	3	92	1,04	45	1,04	38	1,09	323	-8	105	12,1	0,84	1,14	62	1,11	331	38	168,8	9,5
23-21б	Фассалитовые габбро, массив Крестовский	4	3177,5	26,4	11	1608	1,11	780	1,11	2916	1,19	79	62	2	44,8	3,74	1,29	3632	1,13	48	66	2,4	38,1
23-22	Анортозиты, массив Крестовский	5	2719,6	32,7	16	112	1,18	54	1,18	170	1,28	355	-9	4,4	19,8	3,14	1,35	197	1,24	339	17	5	18,4
23-23	Бербахиты, Падъ Широкая	5	3196,7	31,8	10	91	1,05	44	1,05	1780	1,45	331	46	1,03	*	40,3	1,46	1806	1,44	344	53	1,06	*
23-24	Габбро, Танхан	6	3026,3	43,1	17	39	1,02	19	1,02	0,6	1,55	24	34	1,8	40	0,03	1,55	21	1,07	3	72	89,7	3,8
23-25	Габбро, Оргойга	5	3005,7	44,3	18	47	1,05	23	1,05	9	1,34	171	24	2,2	31,3	0,4	1,36	29	1,09	147	88	8,4	12,7
23-26	Амфиболиты	5	3000,9	80,6	12	81	1,03	39	1,03	3	1,51	159	25	1,1	116,4	0,08	1,49	39	1,05	336	79	32,3	7,8
23-27	Метагаббро	5	2894,0	21,2	16	61	1,01	30	1,01	0,8	1,39	99	58	2,8	28,3	0,03	1,4	31	1,01	0	73	586,6	1,5
23-29	Амфиболиты, р. Анга	10	2794,7	129,5	25	154	1,22	74	1,22	11	1,49	25	-19	1,32	50	0,15	1,33	78	1,24	354	73	13,9	8,1
23-38	Габбро	6	2835,7	43,1	16	5420	1,04	2629	1,04	1145	1,14	19	54	2,04	35,76	0,44	1,13	3440	1,06	357	73	14,2	10,1
23-39	Габбро	4	2881,9	134,5	14	59	1,18	29	1,18	7	1,2	1	-31	4,88	20,09	0,26	1,15	28	1,19	359	60	65,9	4,9
23-40, 41	Эклогиты, р. Тонга	11	2982,2	118,1	27	28	1,36	14	1,36	3	1,39	309	51	1,97	28,03	0,25	1,3	18	1,34	336	70	22,84	5,9
24-50	Рудное габбро, массив Тажеран	13	2986,0	237,1	14	635	1,99	308	1,99	40	2,48	10	25	2,47	32,47	0,13	1,31	338	2,03	1	69	93,15	4,2
24-60	Долериты, п. Еланцы	7	3042,2	8,2	16	2834	1,1	1375	1,1	792	1,11	356	25	2,71	28,02	0,58	1,09	1472	1,13	344	50	21,83	8,1

Примечание. N – количество штуков; p – количество кубиков; s – ошибка среднего; e – стандартный множитель; k – кучность; a_{95} – радиус овала доверия с вероятностью 95 %; * – статистическая выборка (не представительная).

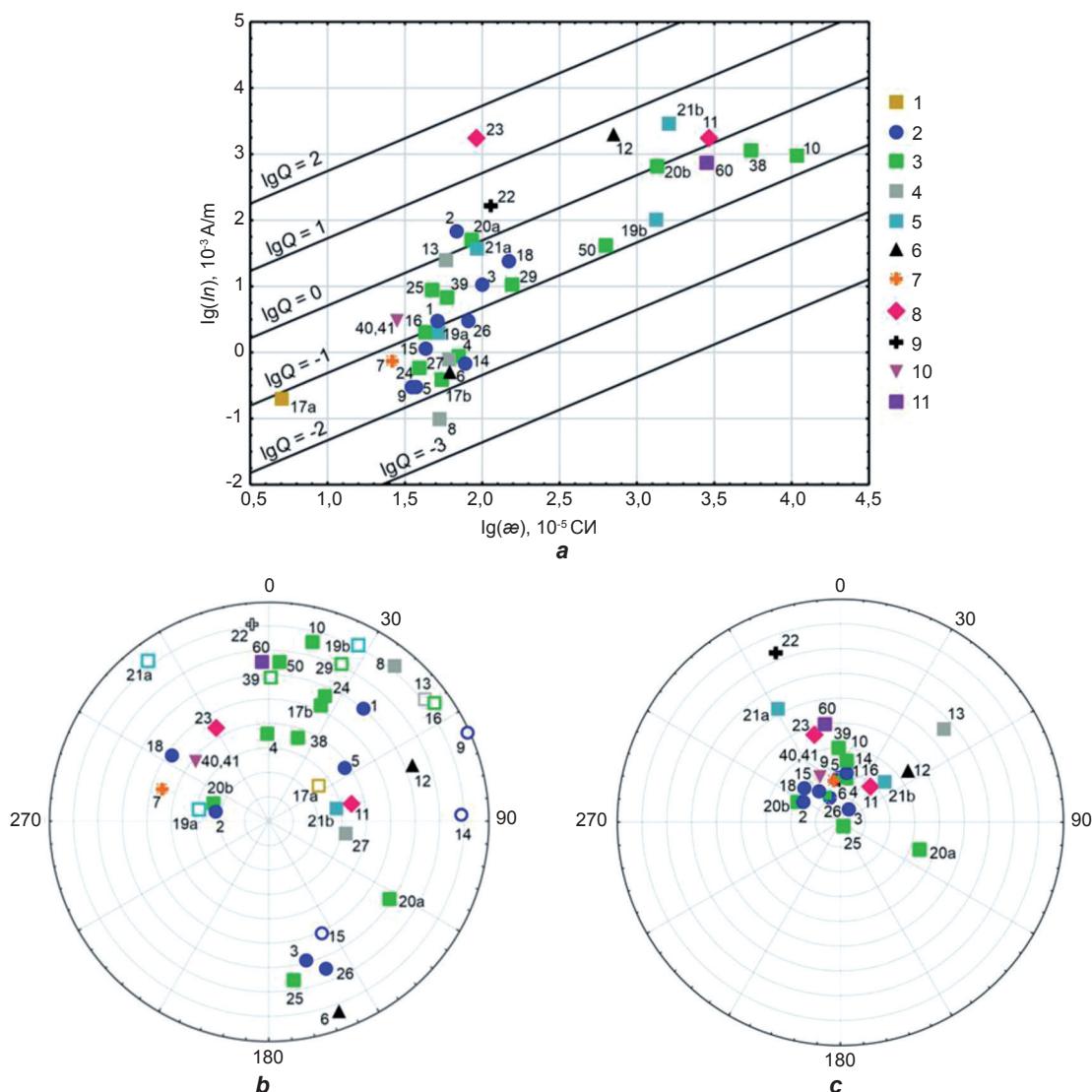


Рис. 4. Спектр магнитных параметров петрофизических таксонов Ольхонского геодинамического полигона:

a – диаграмма рассеивания магнитной восприимчивости α , естественной остаточной намагниченности In и фактора Q
Пetroфизические таксоны:

- 1 – мраморы; 2 – амфиболиты; 3 – габбро; 4 – метагаббро; 5 – фассаитовые габбро;
- 6 – долериты/трахидолериты; обнажение 23-6 / обнажение 23-12; 7 – троктолиты; 8 – беребахиты;
- 9 – анортозиты; 10 – эклогиты; 11 – постколлизионные долериты, обнажение 24-60
- b, c – стереограммы векторов естественной остаточной In (b) и суммарной Is (c) намагниченности

Залимые/полые фигуры – проекции векторов на положительную/отрицательную полусферу

Fig. 4. Spectrum of magnetic parameters of Olkhon geodynamic polygon petrophysical taxa
a – scatter diagram of magnetic susceptibility α , natural remanent magnetization In and factor Q
Petrophysical taxa:

- 1 – marbles; 2 – amphibolites; 3 – gabbro; 4 – metagabbro; 6 – dolerites/trachydolerites, outcrop 23-6 / outcrop 23-12; 7 – troctolites; 8 – beerbachites; 9 – anorthosites;
- 10 – eclogites; 11 – post-collisional dolerites, outcrop 24-60;

b, c – stereograms of vectors of natural remanent In (b) and total Is (c) magnetization
Filled/hollow figures – projections of vectors on positive/negative hemisphere

Наиболее сложная картина наблюдается в распределении значений магнитных параметров (см. табл. 1, рис. 4), которые, как правило, подчиняются логнормальному закону и имеют как минимум две моды. Наиболее контрастно

это наблюдается на гистограмме магнитной восприимчивости α , на которой более 70 % образцов имеют значений менее $100 \cdot 10^{-5}$ СИ, а для 15 % образцов со значениями больше $1000 \cdot 10^{-5}$ СИ относятся ко второй моде. Повы-



шенными значениями магнитной восприимчивости α характеризуются габбро в обнажениях 23-38 и 23-10 – больше 5000 и $10000 \cdot 10^{-5}$ СИ соответственно. Распределения значений индуктивной намагниченности I/I_0 , согласно вышеприведенной формуле, пропорциональны магнитной восприимчивости.

В отличие от магнитной восприимчивости, полимодальное распределение значений естественной остаточной намагниченности выражено не так четко (см. табл. 1, рис. 4), но у около 60 % образцов ее величина не превышает $10 \cdot 10^{-3}$ А/м. У 11 % образцов габбро величина естественной остаточной намагниченности составляет от 1000 до $10000 \cdot 10^{-3}$ А/м, у 2 % может достигать показателя от 30000 до $80000 \cdot 10^{-3}$ А/м (у беербахитов в обнажениях 23-11 и 23-23). В обнажении 23-23 фактор $Q > 40$ (!). Вероятно, что в этих обнажениях естественная остаточная намагниченность могла образоваться в результате наложенных процессов (геологических и физических, например, грозовых разрядов). В ряде обнажений векторы естественной остаточной намагниченности имеют отрицательные наклона J до -60° (см. табл. 1, рис. 4, b), но из-за того, что у большинства изученных образцов фактор $Q < 1$, вектор суммарной намагниченности положительный (см. табл. 1, рис. 4, c).

На графике α - I/I_0 - Q наблюдаются две обособленные группировки, которые условно разделены на слабо- и сильномагнитные (см. рис. 4, a). Особый интерес вызывает тот факт, что на ряде обнажений (23-11, 23-19, 23-20, 23-21 и 23-23) образцы могут принадлежать как к первой, так и ко второй группе. Образцы с относительно повышенными значениями намагниченности представляют первоочередной интерес для дальнейших аналитических, петро- и палеомагнитных исследований.

Результаты аналитических исследований рудных минералов в габброидах и беербахитах Ольхонского террейна показаны на рис. 5. и приведены в табл. 2. Рудные минералы в габбро Тажеранского массива (рис. 5, a–c) представлены магнетитом (более яркий) и ильменитом, их содержание достигает 2–4 % (рис. 6, a). Силикатные минералы – ортопироксен, плагиоклаз, амфибол. Апатит – акцессорный минерал. Магнетит почти не содержит примеси титана и по характеру проявлений разбивается на две группы. Первая образует отдельные зерна или срастания с ильменитом, реже с гетитом (см. рис. 5, b), вторая представ-

лена симплектитами (вместе с ильменитом) в ортопироксене (см. рис. 5, c). Отдельные зерна магнетита и ильменита кристаллизовались непосредственно из расплава, а симплектиты – при остывании породы.

Рудные минералы в беербахитах Тажеранского массива (рис. 5, d–f) представлены магнетитом (более яркий) и ильменитом, их содержание достигает 2–3 % (рис. 5, d). Силикатные минералы – ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, амфибол. Апатит – акцессорный минерал. Магнетит почти не содержит примеси титана и по характеру проявлений разбивается на три группы. Первая группа образует отдельные зерна (рис. 5, e) или срастания с ильменитом, реже с гетитом (рис. 5, f). Размеры выделений магнетита могут достигать 100 мкм. Вторая группа проявления магнетита представлена симплектитами (вместе с ильменитом) в ортопироксене (рис. 5, f). Отдельные зерна магнетита и ильменита кристаллизовались непосредственно из расплава, а симплектиты – при остывании породы. Третья группа магнетита представлена мелкими (1–3 мкм) включениями в амфибол-пироксеновом симплектите.

Измененный норит Бугульдейского массива (строительный карьер, расположенный по трассе Бугульдейка – Петрово, обнажение 23-38) имеет типичную габбровую структуру (рис. 5, g–i). Рудные минералы представлены магнетитом (более яркий) и ильменитом, их содержание достигает 3–4 % (рис. 5, g). Силикатные минералы – ортопироксен, плагиоклаз, в небольших количествах встречаются амфибол и биотит. Апатит – акцессорный минерал. Магнетит почти не содержит примеси титана. Размерность выделений магнетита варьирует от 200–300 до 10–20 мкм (рис. 5, h, g). Крупные зерна нередко образуют срастания с ильменитом (см. рис. 5, h). Реже магнетит встречается в виде прожилков (в ассоциации с апатитом) в ортопироксене (рис. 6, i).

Результаты работы по изучению химического состава рудных минералов в габброидах и беербахитах Ольхонского террейна, проведенной с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены в табл. 2. Согласно источнику [36], изученные минералы ферримагнитной фракции относятся к промежуточной области титаномагнетитовой и гемильменитовой серий, что может соответствовать точке Кюри магнетита $\Theta \approx 580^\circ\text{C}$.

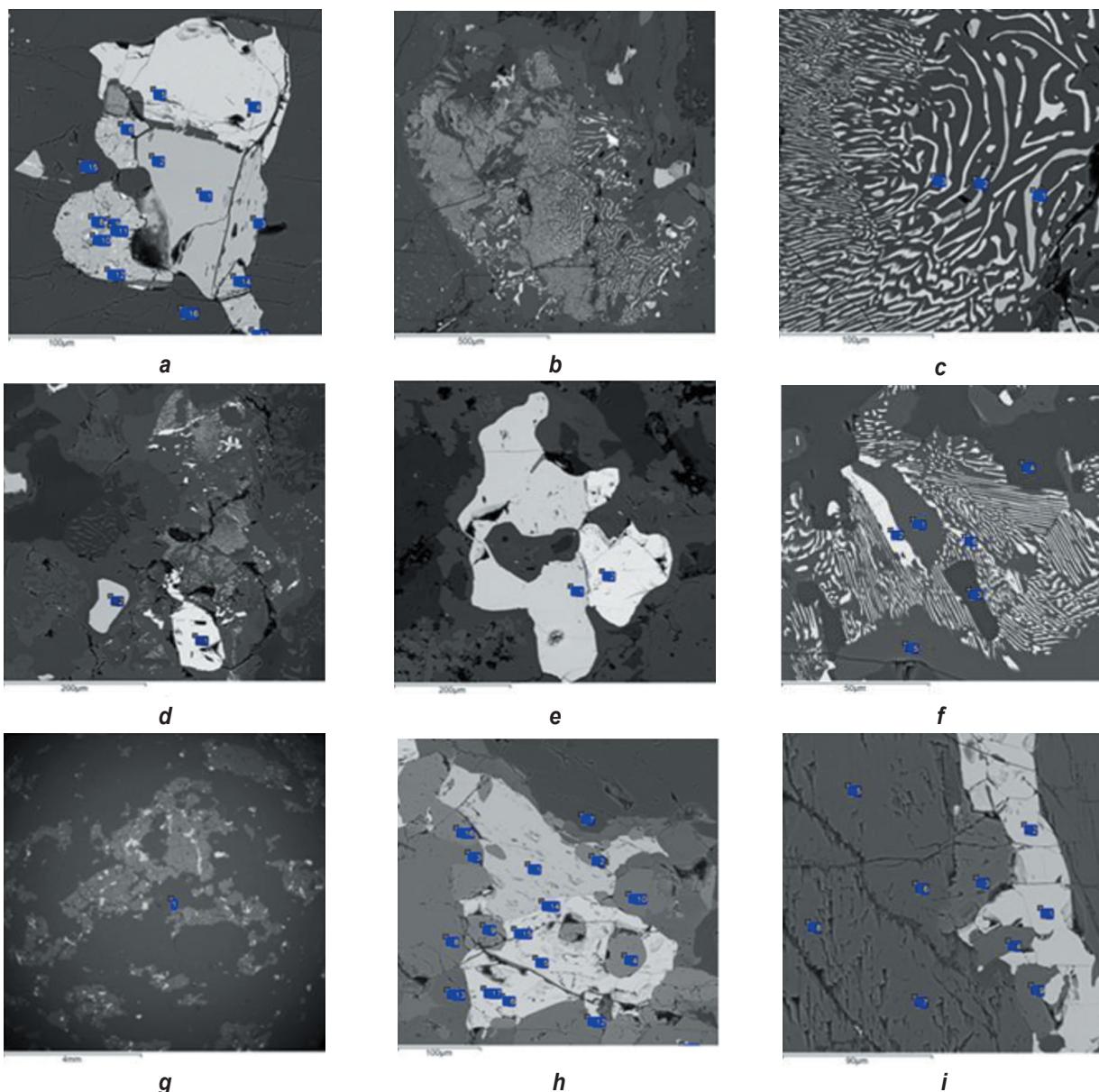


Рис. 5. Изображения в обратно рассеянных электронах:

а–с – образец 47 (габбро, Тажеранский массив, обнажение 23-10):

а – сросток магнетита (4, 5) с ильменитом (1, 2, 3) и гетитом (6, 8), б – симплектиты магнетита и ильменита в ортопироксене (общий вид), с – симплектиты магнетита (3) и ильменита (1) в ортопироксене (2);
д–ф – образец 55 (беербахиты, Тажеранский массив, обнажение 23-11):

д – отдельные относительно крупные зерна магнетита (1) и ильменита (2) среди симплектитов и зерен пироксена и плагиоклаза, е – сросток магнетита (2) с ильменитом (1),
ф – симплектиты магнетита и ильменита в ортопироксене (общий вид):

1 – ильменит, 2, 6 – магнетит, 3, 4 – амфибол, 5 – пироксен;

г–и – образец 175 (норит, Бугульдейский массив, обнажение 23-38):

г – общий вид, х – сросток магнетита с ильменитом: 1 – ильменит, 2, 4, 9, 16 – апатит, 3, 8, 10 – ортопироксен, 5, 6, 11, 15, 17 – магнетит, 7 – плагиоклаз, 12 – биотит, 13 – амфибол; и – «прожилок» магнетита с апатитом в ортопироксene: 1, 2 – магнетит; 3, 4, 9 – апатит; 5–8 – ортопироксен

Fig. 5. Backscattered electron images:

a–c – sample 47 (gabbro, Tazheran massif, outcrop 23-10):

a – intergrowth of magnetite (4, 5) and ilmenite (1, 2, 3) and goethite (6, 8), b – symplectites of magnetite and ilmenite in orthopyroxene (general view), c – symplectites of magnetite (3) and ilmenite (1) in orthopyroxene (2);
d–f – sample 55 (beerbachites, Tazheran Massif, outcrop 23-11):

d – relatively large individual grains of magnetite (1) and ilmenite (2) among symplectites and grains of pyroxene and plagioclase, e – intergrowth of magnetite (2) and ilmenite (1),
f – symplectites of magnetite and ilmenite in orthopyroxene (general view):

1 – ilmenite, 2, 6 – magnetite, 3, 4 – amphibole, 5 – pyroxene; g–i – sample 175 (norite, Buguldeisky massif, outcrop 23-38):
g – general view, h – intergrowth of magnetite and ilmenite: 1 – ilmenite, 2, 4, 9, 16 – apatite, 3, 8, 10 – orthopyroxene,

5, 6, 11, 15, 17 – magnetite, 7 – plagioclase, 12 – biotite, 13 – amphibole;

i – “veinlet” of magnetite and apatite in orthopyroxene: 1, 2 – magnetite; 3, 4, 9 – apatite; 5–8 – orthopyroxene

**Таблица 2. Химический состав рудных минералов в габброидах и беербахитах**

Ольхонского террейна

Table 2. Chemical composition of ore minerals in gabbroids and beerbachites of the Olkhon terrane

Обнажение	Образец	Химический состав								Итог	
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO		
38	175	0,13	0	0,45	0,18	0,69	66,99	31,18	0	0	98,93
		0	0	0,47	0,19	0,72	67,90	31,31	0	0	99,87
		0,21	0,35	0,36	0,16	0,72	66,24	31,61	0	0	98,93
		0,17	0,32	0,51	0,22	0,66	66,33	31,60	0	0	99,15
		0,17	0	0,4	0,16	0,68	67,92	31,65	0	0	100,29
		0	0	0,43	0	0,71	67,39	30,96	0	0	98,78
		0	0	0,47	0	0,71	67,77	31,16	0	0	99,40
	178	0,21	0	0,23	0,2	0,6	67,04	31,21	0	0	98,88
		0,17	1,03	0,23	0	0,54	65,58	32,19	0	0	99,20
		0,13	1,43	0,21	0,16	0,56	64,99	32,62	0	0	99,54
		0,13	21,37	0	0	0,84	26,68	50,38	0,77	0	99,33
		0	33,01	0	0	0,74	4,24	60,26	1,36	0	98,87
		0,11	30,34	0	0	0,84	9,12	58,08	1,25	0	98,90
		0,3	0,13	0,23	0	0,28	66,73	31,27	0	0	98,66
		0,28	0,3	0,36	2,22	0,35	65,12	31,98	0	0	100,26
		0,28	0	0,23	1,02	0,41	65,46	30,96	0	0	97,96
10	47	0,11	0,18	0,64	0,18	0,84	66,03	31,23	0	0	98,37
		0,06	0,32	0,55	0,19	0,9	66,69	31,63	0	0	99,44
		2,4	0,32	1,36	0	0,66	61,57	35,29	0	0	100,94
	50	0	0,35	0,53	0	0,85	66,40	31,28	0	0	98,56
		0	2,19	0,36	0	0,84	63,84	33,32	0	0	99,71
		0,09	1,1	0,43	0	0,85	64,77	32,05	0	0	98,44
		0	1,43	0,42	0	0,79	64,22	32,14	0	0	98,21
11	55	0	0,45	2,65	0,13	0,25	64,77	32,00	0	0	100,00
		0,19	0,55	2,36	0,13	0,21	63,03	31,63	0	0	97,88
		0,26	0,47	2,53	0,15	0,16	63,65	32,04	0	0	99,09
		1,31	0,32	2,46	0	0	62,61	33,02	0	0,33	100,05
		0	0,28	1,62	5,12	1	60,88	31,94	0	0	99,84
		0	0,38	1,55	5,09	0,96	59,87	31,58	0	0	98,47
		0,19	0,27	1	0,15	0,28	65,61	31,37	0	0	98,59
	51	0	0,2	0,51	1,49	1,02	65,59	31,42	0	0	99,21
		0,15	0,2	0,62	1,02	0,76	65,02	31,25	0	0	98,26
		0,21	0,52	0,57	0,89	0,74	64,84	31,79	0	0	98,82
		0,83	0,13	0,43	2,25	0,63	63,47	32,45	0	0	99,56
		0,3	0,9	0,53	3,41	0,75	63,09	33,07	0	0	101,30

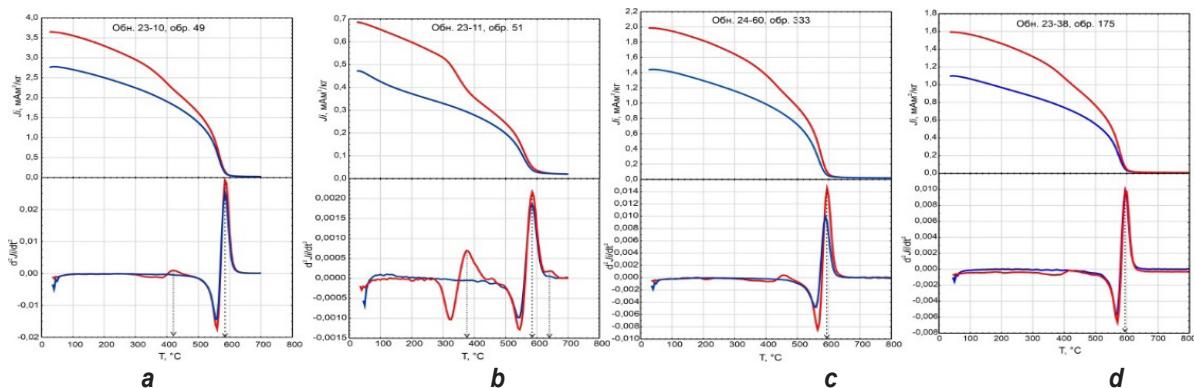


Рис. 6. Результаты дифференциального термомагнитного анализа по индуктивной намагниченности $Ji = f(T)$ габбро (а), беербахитов (б), долеритов (с) и норитов (д) Ольхонского региона
 Красная и синяя линии – процессы нагрева и охлаждения

Fig. 6. Results of differential thermomagnetic analysis by inductive magnetization $Ji = f(T)$ of gabbro (a), beerbachites (b), dolerites (c) and norites (d) of the Olkhon region
 Red and blue lines – heating and cooling processes

Химический состав рудных минералов в изученных габброидах и беербахитах Ольхонского террейна достаточно хорошо корреспондирует с результатами дифференциального термомагнитного анализа (см. рис. 6). Практически на всех термомагнитограммах по максимуму втор-

ой производной d^2Ji/dT^2 устанавливается магнетит с точкой Кюри $\Theta \approx 580$ °С, в ряде случаев возможно присутствие примесей изоморфных ферримагнитных минералов (гётит, магемит).

Согласно данным магнито-структурного анализа (рис. 7, а–с) изученные габброиды,

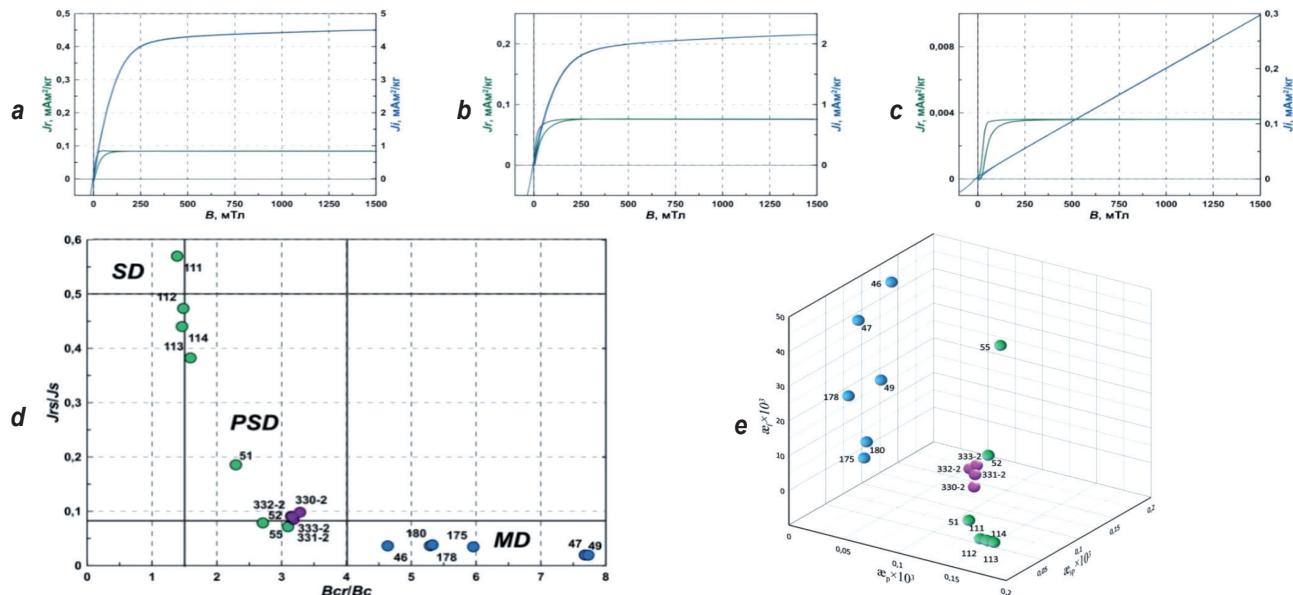


Рис. 7. Результаты магнито-структурного анализа габброидов (синие кружочки), беербахитов (зеленые кружочки) и долеритов (сиреневые кружочки) Ольхонского региона:
 а–с – петли гистерезиса индуцированной Ji (синяя) и остаточной Jr (зеленая) намагниченностей насыщения: а – габбро, образец 49, обнажение 23-10, б – нориты, образец 180, обнажение 23-38, с – беербахиты, образец 111, обнажение 23-23; д – диаграмма Дэя (SD, PSD, MD – области распределения, соответственно, одно-, псевдоодно- и многодоменных зерен); е – диаграмма рассеяния магнитной восприимчивости, показывающая ферро- (α_f), диа/пара- (α_p) и суперпарамагнитную (α_{sp}) ее составляющие
 Кружочки: синие – габброиды, зеленые – беербахиты, фиолетовые – долериты

Fig. 7. Results of magnetostructural analysis of gabbroids (blue circles), beerbachites (green circles) and dolerites (purple circles) of the Olkhon region:
 a–c – hysteresis loops of induced Ji (blue) and remanent Jr (green) magnetizations of saturation: a – gabbro, sample 49, outcrop 23-10, b – norites, sample 180, outcrop 23-38, c – beerbachites, sample 111, outcrop 23-23;
 d – Day diagram (SD, PSD, MD – distribution areas of single-, pseudo-single- and multidomain grains, respectively);
 e – magnetic susceptibility scatter diagram showing its ferro- (α_f), dia/para- (α_p) and superparamagnetic (α_{sp}) components
 Circles: blue – gabbroids, green – beerbachites, purple – dolerites



беербахиты и долериты характеризуются разным строением зерен минералов ферримагнитной фракции (рис. 7, *d*, *e*). Несмотря на то что по составляющей магнитной восприимчивости габброиды относятся к ферримагнитной фракции, в них преобладают многодоменные частицы. В то же время минералы ферримагнитной фракции беербахитов, имеющие повышенную парамагнитную составляющую магнитной восприимчивости, могут характеризоваться псевдо- и однодоменным строением. Причем беербахиты Крестовского массива (образцы 111–114, обнажение 23-23) стремятся сгруппироваться ближе к однодоменной области. Долериты постколлизионной дайки (образцы 330–333, обнажение 24-60) также характеризуются псевдооднодоменной структурой минералов ферримагнитной фракции.

В этой связи беербахиты и долериты имеют более высокую вероятность сохранности векторов характеристической естественной остаточной намагниченности для изучения их палеомагнетизма.

В ходе лабораторных размагничиваний температурой и переменным магнитным полем в беербахитах и долеритах были установлены крутые отрицательные векторы характеристической естественной остаточной намагниченности (рис. 8), по которым рассчитаны виртуальные геомагнитные полюсы в географической (современной) системе координат (табл. 3). Полученные палеомагнитные данные по Приольхонью достаточно хорошо согласуются с позднепалеозойской естественной остаточной намагниченностью, установленной в дайковых рядах юга Сибирской платформы [37].

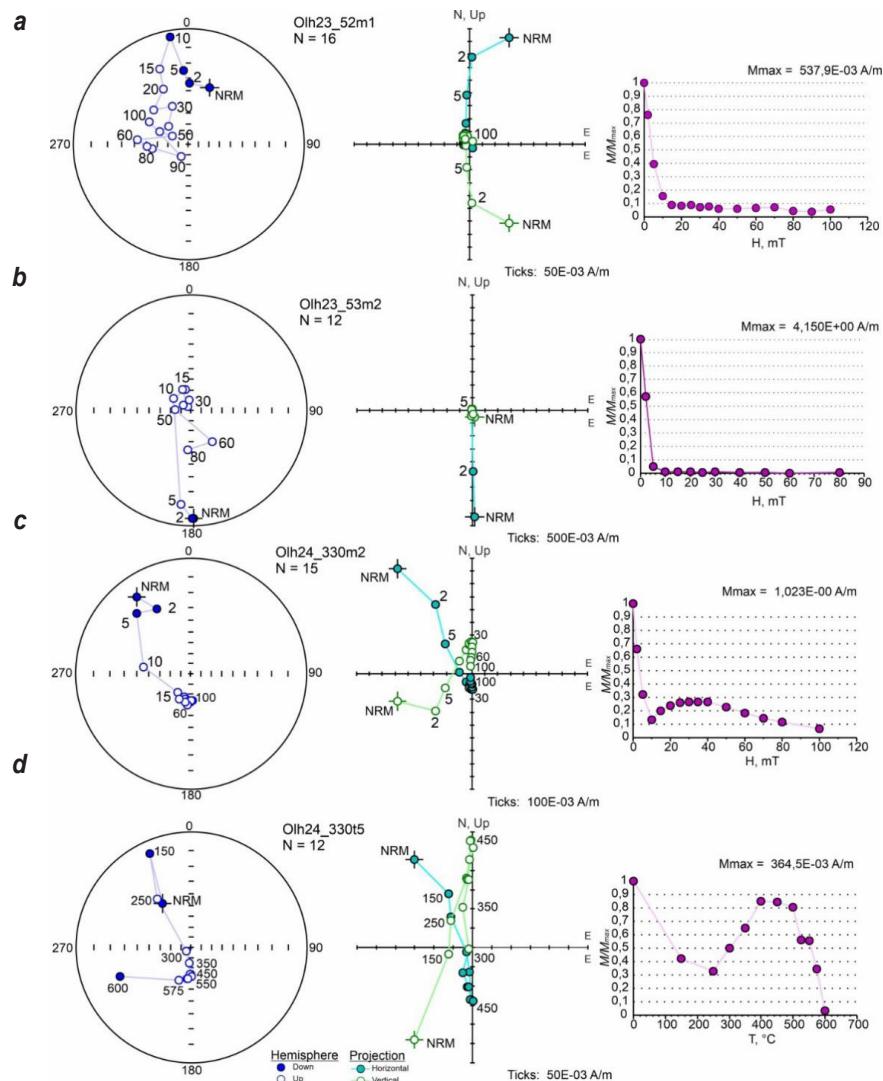


Рис. 8. Палеомагнитные исследования базитов Ольхонского региона:
a, b – беербахиты, обнажение 23-11; c, d – постколлизионные долериты, обнажение 24-60
Fig. 8. Palaeomagnetic studies of Olkhon region basites:
a, b – beerbachites, outcrop 23-11; c, d – postcollisional dolerites, outcrop 24-60



Таблица 3. Палеомагнитные характеристики порофизических таксонов Ольхонского геодинамического полигона (географическая система координат)
Table 3. Paleomagnetic characteristics of petrophysical taxa of the Olkhon geodynamic polygon (geographic coordinate system)

Объект	<i>n</i>	<i>D</i> , град.	<i>J</i> , град.	<i>k</i> , град.	α_{95} , град.	Φ , град.	Λ , град.	<i>dp/dm</i> , град.	<i>fm</i> , град.
Беербахиты, обнажение 23-11	5	286	-78	16,7	19,3	42	137	34,2/36,3	67
Долериты, дайка постколлизионная, обнажение 24-60	7	158	-72	12,4	17,9	77	48	28,3/31,8	58

Примечание. $\varphi = 52^\circ 54'$; $\lambda = 106^\circ 38'$; *n* – количество образцов, участвующих в статистике. Параметры группировки векторов характеристической естественной остаточной намагниченности: *D* – склонение; *J* – наклонение; *k* – кучность; α_{95} – овал доверия с вероятностью 95 %. Виртуальный геомагнитный полюс: Φ – широта; Λ – долгота; *dp/dm* – полуоси овала доверия; *fm* – палеоширота.

Заключение

В ходе выполнения порофизических работ в Приольхонье (см. рис. 1 и 2) были получены два основных результата.

1. Рассчитаны дескриптивные характеристики (средние значения, ошибки и т. п.) порофизических параметров (плотность, намагниченность) наиболее важных порофизических таксонов (см. табл. 1, рис. 4). На этой фактографии заложена современная основа порофизической легенды Приольхонья, которую в перспективе целесообразно использовать в физико-геологическом моделировании и для уточнения аэрокосмической геологической карты.

2. Установлены палеомагнитные направления беербахитов и долеритов (см. рис. 8, табл. 3). Основным минералом-носителем характеристической естественной остаточной намагниченности является магнетит с точкой

Кюри около 580 °С (см. рис. 6), обладающей псевдо-однодоменной структурой (см. рис. 7). Данный вывод надежно подтверждается проведенными аналитическими исследованиями (см. табл. 2). Предварительная геодинамическая интерпретация полученных палеомагнитных данных допускает, что сформировавшие векторы характеристической естественной остаточной намагниченности тектономагматические процессы проистекали позже (возможно, средний палеозой) коллизионных событий Сибирской платформы и Ольхонского террейна и связанных с ними процессами метаморфизма. Дальнейшие исследования порофизических таксонов Приольхонья по доказательству природы векторов характеристической естественной остаточной намагниченности помогут при уточнении истории геодинамического развития региона (см. рис. 3).

Список источников

- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Лавренчук А.В. [и др.]. Коллизионная система Западного Прибайкалья: аэрокосмическая геологическая карта Ольхонского региона (Байкал, Россия) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 447–452. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0485>. EDN: YVJJH.
- Турутанов Е.Х. Морфология базитовых интрузий Ольхонского региона по гравимагнитным данным (Западное Прибайкалье). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. 208 с.
- Черский И.Д. О результатах исследования озера Байкал // Записки Восточно-Сибирского отделения Русского географического общества. 1862. Т. 15. № 3. 78 с.
- Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. Т. 2. М.: Недра, 1967. 699 с.
- Новосёлова М.Р., Зорин Ю.А. Строение земной коры и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны и возможности прогноза сейсмичности // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. М.: Наука, 1978. С. 101–126.
- Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хайн Е.В., Каргополов С.А., Гибшер А.С., Изох Э.А. Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. 1995. № 3. С. 3–22.
- Fedorovsky V.S., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Khromykh S.V., Mazukabzov A.M., Mekhonoshin A.S., et al. The Ol'khon collision system (Baikal region) // Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: northeastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480) / Ed. E.V. Sklyarov. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. P. 3–76.



8. Федоровский В.С., Скляров Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М. Сдвиговый тектогенез и щелочнобазитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 682–700. EDN: MKTVKR.
9. Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., et al. Pre-collisional (≤ 0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian orogenic belt // Gondwana Research. 2017. Vol. 42. P. 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.
10. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н., Сергеев С.А. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 571–588. EDN: MKTVFH.
11. Добречов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 93–108. EDN: HYIVZT.
12. Юдин Д.С., Хромых С.В., Мехоношин А.С., Владимиров А.Г., Травин А.В. Колотилина Т.Б. [и др.]. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст и геохимические признаки синколлизионных габброидов и гранитов Западного Прибайкалья (на примере Бирхинского массива и его складчатого обрамления) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 2. С. 251–255. EDN: HSFUBN.
13. Владимиров А.Г., Изох А.Э., Поляков Г.В., Бабин Г.А., Мехоношин А.С., Крук Н.Н. [и др.]. Габбро-гранитные интрузивные серии и их индикаторное значение для геодинамических реконструкций // Петрология. 2013. Т. 21. № 2. С. 177. <https://doi.org/10.7868/S0869590313020076>. EDN: PUAVAD.
14. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kröner A., Fedorovsky V.S., et al. Petrology, geochronology, and tectonic implications of c. 500 Ma metamorphic and igneous rocks along the northern margin of the Central-Asian orogen (Olkhon terrane, Lake Baikal, Siberia) // Journal of the Geological Society. 2008. Vol. 165. P. 235–246. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-125>.
15. Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Федоровский В.С., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Котов А.Б. [и др.]. Региональный, контактовый метаморфизм и автометаморфизм Ольхонского терреяна (Западное Прибайкалье) // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 55–71. <https://doi.org/10.31857/S0869590320010057>. EDN: IWBLAT.
16. Константинов К.М. Время и геодинамическая позиция формирования метасоматитов Мамской кристаллической полосы по палеомагнитным данным (Байкальская складчатая область) // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: материалы семинара (пос. Борок, 19–22 октября 2006 г.). М.: Издательство ГЕОС, 2006. С. 84–88.
17. Беличенко В.Г., Скляров Е.В., Добречов Н.Л., Томуртогоо О. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7–8. С. 29–40.
18. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 328 с.
19. Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Konstantinov K.M. Biolithogenetic settings in neoproterozoic marginal seas of the Paleoasian ocean // Gondwana Research. 2001. Vol. 4. Iss. 4. P. 788–789. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70572-4](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70572-4).
20. Никишин А.М., Соборнов К.О., Прокопьев А.В., Фролов С.В. Тектоническая история Сибирской платформы в венде-фанерозое // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2010. № 1. С. 3–16. EDN: LAJYOV.
21. Скляров Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Левицкий В.И. [и др.]. Карбонатиты в коллизионных обстановках и квазикарбонатиты Ольхонской коллизионной системы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1409–1427. EDN: KZAXUL.
22. Sklyarov E.V., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Semenova D.V. Geology, petrology and mineralogy of hornfels-like rocks (beerbachite) in the Early Paleozoic Olkhon collisional orogen (West Baikal area, Russia) // Minerals. 2023. Vol. 13. P. 1370. <https://doi.org/10.3390/min13111370>.
23. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Pushkarev E.V., Semenova D.V., Starikova A.E. Dismembered ophiolite of the Olkhon composite terrane (Baikal, Russia): petrology and emplacement // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 4. P. 305. <https://doi.org/10.3390/min10040305>.
24. Лавренчук А.В., Скляров Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Федоровский В.С. [и др.]. Особенности состава габброидов Крестовской зоны (Западное Прибайкалье) как отражение взаимодействия надсубдукционной литосферной мантии с мантийным плутоном // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 10. С. 1439–1458. <https://doi.org/10.15372/GiG20171001>. EDN: ZNJACF.
25. Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Семенова Д.В. Ассимиляция карбонатов базитовыми магмами: фассаитовые габбро Ольхонского терреяна (Западное Прибайкалье) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 519. № 1. С. 453–463. <https://doi.org/10.31857/S2686739724110093>. EDN: AGIDBR.
26. Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Пушкарев Е.В., Старикова А.Е., Степанов К.М. Беербахиты Приольхонья: геологическая позиция, минералогия и механизмы образования // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): сб. тр. конф. (г. Иркутск, 17–20 октября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. Т. 15. С. 254–257. EDN: ZVYDHT.
27. Мазукабзов А.М., Федоровский В.С. Коллизионный шов системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн в Западном Прибайкалье // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): сб. тр. конф. (г. Иркутск, 17–20 октября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. Т. 15. С. 174–175. EDN: ZVPSLT.
28. Zijderveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results // Methods in paleomagnetism / eds. S.K. Runcorn, K.M. Creer, D.W. Collinson. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.



29. Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 13. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
30. Dunlop D.J., Ozdemir O. Rock magnetism. Fundamentals and frontiers. N.Y.: Cambridge University Press, 1997. 573 p.
31. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction // ARPN Journal of Earth Sciences. 2015. Vol. 4. Iss. 1. P. 1–6.
32. Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во Казанского университета, 1979. 160 с.
33. Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 658 с.
34. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney: The Pacific Geoscience Centre, 1994. 16 p.
35. Константинов К.М., Забелин А.В., Зайцевский Ф.К., Константинов И.К., Киргуев А.А., Хороших М.С. Структура и функции петромагнитной базы данных "RSEARCH" Якутской кимберлитовой провинции // Геоинформатика. 2018. № 4. С. 30–39. EDN: YPXHRB.
36. Akimoto S. Magnetic properties of FeO – Fe₂O – TiO₂ system as a basis of rock magnetism // Journal of the Physical Society of Japan. 1961. Vol. 17. P. 706–710.
37. Константинов К.М., Хузин М.З., Гладкочуб Д.П. Позднепалеозойская естественная остаточная намагниченность дайковых роев юга Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосфера Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы совещания. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. В 2 т. Т. 1. № 4. С. 171–174.

References

1. Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Lavrenchuk A.V., et al. Collision system of West Pribaikalie: aerospace geological map of Olkhon region (Baikal, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):447-452. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0485>. EDN: YVJJIH.
2. Turutanov E.Kh. *Morphology of the Olkhon region mafic intrusions according to gravimagnetic data (Western Baikal region)*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, 208 p. (In Russ.).
3. Cherskii I.D. On study results of Lake Baikal. *Zapiski Vostochno-Sibirskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 1862;15(3):78. (In Russ.).
4. Salop L.I. *Geology of the Baikal mountain region*. Vol. 2. Moscow: Nedra; 1967, 699 p. (In Russ.).
5. Novoselova M.R., Zorin Yu.A. Structure of the Baikal rift zone earth's crust and upper mantle and seismicity forecasting possibilities. In: *Rezul'taty kompleksnykh geofizicheskikh issledovanii v seismoopasnykh zonakh = Results of integrated geophysical studies in seismic zones*. Moscow: Nauka; 1978, p. 101-126. (In Russ.).
6. Fedorovskii V.S., Vladimirov A.G., Khain E.V., Kargopolov S.A., Gibsher A.S., Izokh Eh.A. Tectonics, metamorphism and magmatism of the collision zones of the caledonides of Central Asia. *Geotektonika*. 1995;3:3-22. (In Russ.).
7. Fedorovsky V.S., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Khromykh S.V., Mazukabzov A.M., Mekhonoshin A.S., et al. The Ol'khon collision system (Baikal region). In: Sklyarov E.V. (ed.). *Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: northeastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480)*. Irkutsk: Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005, p. 3-76.
8. Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Izokh A.E., Lavrenchuk A.V., Kotov A.B. Strike-slip tectogenesis and alkaline mafic magmatism in the collision system of the Western Baikal region caledonides. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):682-700. (In Russ.). EDN: MKTVKR.
9. Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., et al. Pre-collisional (≤ 0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian orogenic belt. *Gondwana Research*. 2017;42:243-263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.
10. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Fedorovskii V.S., Mazukabzov A.M., Larionov A.N., Sergeev S.A. Olkhon metamorphic terrane of the Baikal region: Early Paleozoic composite of Neoproterozoic active margin fragments. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):571-588. (In Russ.). EDN: MKTVFH.
11. Dobretsov N.L., Buslov M.M. Late Cambrian-Ordovician tectonics and geodynamics of Central Asia. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(1):93-108. (In Russ.). EDN: HYIVZT.
12. Yudin D.S., Khromykh S.V., Vladimirov A.G., Travin A.V., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., et al. 40AR/39AR-age and geochemical features of syncollisional gabbroids and granites of the Western Baikal region (on example of the Birkha massif and its folded framing). *Doklady Akademii Nauk*. 2005;405(2):251-255. (In Russ.). EDN: HSFUBN.
13. Vladimirov A.G., Izokh A.E., Polyakov G.V., Babin G.A., Mekhonoshin A.S., Kruk N.N., et al. Gabbro-granite intrusive series and their indicator value for geodynamic reconstructions. *Petrologia*. 2013;21(2):177. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869590313020076>. EDN: PUAVAD.
14. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kröner A., Fedorovsky V.S., et al. Petrology, geochronology, and tectonic implications of c. 500 Ma metamorphic and igneous rocks along the northern margin of the Central-Asian orogen (Olkhon terrane, Lake Baikal, Siberia). *Journal of the Geological Society*. 2008;165:235-246. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-125>.



15. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovskii V.S., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Kotov A.B., et al. Regional, contact metamorphism and autometamorphism of the Olkhon terrane (Western Baikal region). *Petrologia*. 2020;28(1):55-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869590320010057>. EDN: IWBLAT.
16. Konstantinov K.M. Time and geodynamic position of Mamacrystalline band formation of metasomatites according to paleomagnetic data (Baikal folded region). In: *Paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: teoriya, praktika, eksperiment: materialy seminara = Palaeomagnetism and magnetism of rocks: theory, practice, experiment: seminar materials*. 19–22 October 2006, Borok. Moscow: Izdatel'stvo GEOS; 2006, p. 84-88.
17. Belichenko V.G., Sklyarov E.V., Dobretsov N.L., Tomurtogoo O. Geodynamic map of the Paleoasian ocean. Eastern segment. *Geologiya i geofizika*. 1994;35(7-8):29-40. (In Russ.).
18. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. *Lithospheric plate tectonics on the territory of the USSR*. In 2 books. Book 1. Moscow: Nedra; 1990, 328 p. (In Russ.).
19. Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Konstantinov K.M. Biolithogenetic settings in neoproterozoic marginal seas of the Paleoasian ocean. *Gondwana Research*. 2001;4(4):788-789. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70572-4](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70572-4).
20. Nikishin A.M., Sobornov K.O., Prokopiev A.V., Frolov S.V. Vendian to Phanerozoic tectonic history of the Siberian platform region. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriâ 4: Geologiâ*. 2010;1:(3-16). (In Russ.). EDN: LAJYOV.
21. Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., Levitskii V.I., et al. Olkhon collisional systemcarbonatites in collisional settings and quasi-carbonatites. *Geologiya i geofizika*. 2009;50(12):1409-1427. (In Russ.). EDN: KZAXUL.
22. Sklyarov E.V., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Semenova D.V. Geology, petrology and mineralogy of hornfels-like rocks (beerbachite) in the Early Paleozoic Olkhon collisional orogen (West Baikal area, Russia). *Minerals*. 2023;13:1370. <https://doi.org/10.3390/min13111370>.
23. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Pushkarev E.V., Semenova D.V., Starikova A.E. Dismembered ophiolite of the Olkhon composite terrane (Baikal, Russia): petrology and emplacement. *Minerals*. 2020;10(4):305. <https://doi.org/10.3390/min10040305>.
24. Lavrenchuk A.V., Sklyarov E.V., Izokh A.Eh., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Fedorovskii V.S., et al. Compositional features of Krestovskaya area gabbroids(Western Baikal region) as a reflection of suprasubduction lithospheric mantle interaction with mantle plum. *Geologiya i geofizika*. 2017;58(10):1439-1458. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20171001>. EDN: ZNJACF.
25. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Semenova D.V. Assimilation of carbonates by mafic magma: fassaite gabbro of the Olkhon terrane (Western Baikal region). *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2024;519(1):453-463. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739724110093>. EDN: AGIDBR.
26. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Starikova A.E., Stepanov K.M. Beerbakhites of the Olkhon region: geological position, mineralogy and formation mechanisms. In: *Geodinamicheskaya ehvolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): sb. tr. konf. = Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): conference proceedings*. 17–20 October 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, vol. 15, p. 254-257. (In Russ.). EDN: ZVYDHT.
27. Mazukabzov A.M., Fedorovskii V.S. Collision suture of the Siberian craton – Olkhon terrane system in the Western Baikal region. In: *Geodinamicheskaya ehvolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): sb. tr. konf. = Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): conference proceedings*. 17–20 October 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, vol. 15, p. 174-175. (In Russ.). EDN: ZVPSLT.
28. Zijderveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: S.K. Runcorn, K.M. Creer, W. Collinson (eds). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, p. 254-286.
29. Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977;13:260-267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
30. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock magnetism. Fundamentals and frontiers*. New York: Cambridge University Press; 1997, 573 p.
31. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction. *ARPN Journal of Earth Sciences*. 2015;4(1):1-6.
32. Burov B.V., Yasonov P.G. *Introduction to differential thermomagnetic analysis of rocks*. Kazan: Kazan Federal University; 1979, 160 p. (In Russ.).
33. Borovikov V.P. *STATISTICA: the art of computer data analysis. For professionals*. Saint Petersburg: Piter; 2001, 658 p. (In Russ.).
34. Enkin R.J. *A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data*. Sidney: The Pacific Geoscience Centre; 1994, 16 p.
35. Konstantinov K.M., Zabelin A.V., Zaitsevskiy F.K., Konstantinov I.K., Kirguev A.A., Khoroshikh M.S. Structure and functions of the petromagnetic "RSEARCH" database of the Yakut kimberlite province. *Geoinformatika*. 2018;4:30-39. (In Russ.). EDN: YPXHRB.
36. Akimoto S. Magnetic properties of FeO – Fe₂O – TiO₂ system as a basis of rock magnetism. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1961;17:706-710.



37. Konstantinov K.M., Khuzin M.Z., Gladkochub D.P. Late Paleozoic natural remanent magnetization of dike swarms in the southern Siberian platform. In: *Geodinamicheskaya ehvolvutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvishhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): materialy soveshchaniya = Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): meeting materials*. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, in 2 vol., vol. 1, iss. 4, p. 171-174. (In Russ.).

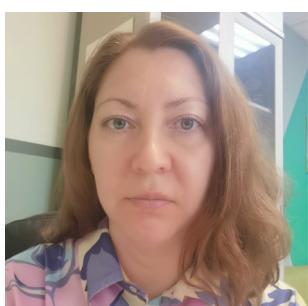
Information about the authors / Информация об авторах



Константинов Константин Михайлович,
доктор геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>
Konstantin M. Konstantinov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>



Скляров Евгений Викторович,
доктор геолого-минералогических наук,
член-корреспондент РАН, профессор,
заведующий лабораторией палеогеодинамики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
skl@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9194-5506>
Evgeny V. Sklyarov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor,
Head of the Palaeogeodynamics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
skl@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9194-5506>



Косарева Лина Раисовна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,
lina.kosareva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0969-1261>
Lina R. Kosareva,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher,
Institute of Geology and Oil and Gas Technologies,
Kazan (Volga region) Federal University,
Kazan, Russia,
lina.kosareva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0969-1261>



Лавренчук Андрей Всеволодович,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии
и рудоносности магматических формаций,
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Россия,
доцент кафедры минералогии и геохимии,
Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Россия,
alavr@igm.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2833-1405>

Andrey V. Lavrenchuk,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Petrology
and Ore-bearing Igneous Formations,
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia,
Associate Professor of the Mineralogy and Geochemistry Department,
Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russia,
alavr@igm.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2833-1405>



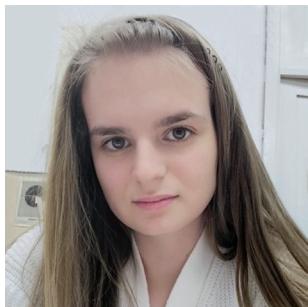
Пушкирев Евгений Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией петрологии магматических формаций,
Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваринского
Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
pushkarev@igg.uran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0912-8580>

Evgeny V. Pushkarev,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Petrology of Igneous Formations,
Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia,
pushkarev@igg.uran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0912-8580>



Константинов Герман Константинович,
студент,
техник 1 категории департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
hkonstantinov@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0514-9843>

German K. Konstantinov,
Student,
1st Category Technician of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
hkonstantinov@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0514-9843>



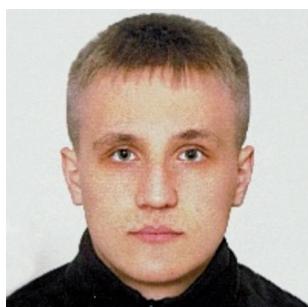
Воробьева Полина Никитична,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
vpolina23111888@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-3443-6472>
Polina N. Vorobyeva,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
vpolina23111888@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-3443-6472>



Дугарова Аяна Евгеньевна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
техник-геофизик,
ООО «Сигма-Гео»,
г. Иркутск, Россия,
ayanadugarova@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-5929-136X>
Ayana E. Dugarova,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Geophysical Technician,
Sigma-Geo LLC,
Irkutsk, Russia,
ayanadugarova@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-5929-136X>



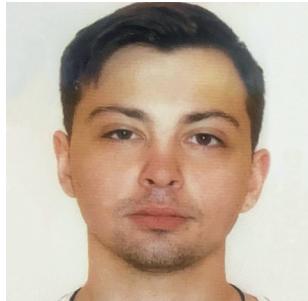
Перова Вероника Александровна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
техник-геофизик,
ООО «Сигма-Гео»,
г. Иркутск, Россия,
ronnipeperonni@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-3166-2399>
Veronika A. Perova,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Geophysical Technician,
Sigma-Geo LLC,
Irkutsk, Russia,
ronnipeperonni@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-3166-2399>



Пилипенко Николай Иванович,
студент,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
nik.pilipenko.03@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9327-1517>



Nikolay I. Pilipenko,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
nik.pilipenko.03@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9327-1517>



Сиселятин Егор Андреевич,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
e.siselyatin@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-6749-213>

Egor A. Siselyatin,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
e.siselyatin@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-6749-213>



Тулесонова Эржена Баировна,
студент,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
tulesonova29099@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-7950-5900>

Erzhena B. Tulesonova,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
tulesonova29099@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-7950-5900>

Вклад авторов / Contribution of the authors

К.М. Константинов – разработка концепции, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Е.В. Скляров – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Л.Р. Косарева – проведение исследования, написание черновика рукописи.

А.В. Лавренчук – проведение исследования, редактирование рукописи.

Е.В. Пушкарев – проведение исследования.

Г.К. Константинов – проведение исследования, формальный анализ.

П.Н. Воробьева – проведение исследования.

А.Е. Дугарова – проведение исследования, визуализация.

В.А. Перова – проведение исследования, визуализация.

Н.И. Пилипенко – проведение исследования.

Е.А. Сиселятин – проведение исследования.

Э.Б. Тулесонова – проведение исследования.

Konstantin M. Konstantinov – conceptualization, investigation, writing – original draft, writing – editing.

Evgeny V. Sklyarov – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Lina R. Kosareva – investigation, writing – original draft.

Andrey V. Lavrenchuk – investigation, writing – editing.

Evgeny V. Pushkarev – investigation.

German K. Konstantinov – investigation, formal analysis.

Polina N. Vorobeva – investigation.

Ayana E. Dugarova – investigation, visualization.

Veronika A. Perova – investigation, visualization.



Nikolay I. Pilipenko – investigation.
Egor A. Siselyatin – investigation.
Erzhena B. Tulesonova – investigation.

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 07.02.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2025; принятa к публикации 17.03.2025.

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 18.02.2025; accepted for publication 17.03.2025.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.370+550.834+550.822

EDN: XYILPH

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64



**Опытно-методические геофизические и буровые работы
для изучения геометрии, состояния и свойств
скрытых фундаментов**

А.В. Лазурченко^{a✉}, А.Г. Дмитриев^b, А.В. Мироманов^c, А.Б. Губанов^d

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

Резюме. В настоящее время большинство предприятий (заводов) ведут свою деятельность в зданиях, построенных во времена Советского Союза. В связи с этим появилась необходимость оценки состояния цехов и их дальнейшей реконструкции. Целью проведенного исследования являлась оценка состояния несущих конструкций здания химического завода, включая подземные фундаменты. После проведения шурфования некоторых подземных железобетонных конструкций несущей части исследуемого здания было определено несоответствие реальных геометрических параметров конструкций с их проектными характеристиками (согласно проектным документам). Для изучения состояния несущей конструкции в виде скрытых фундаментов без остановки производства были привлечены геофизические методы в комплексе с бурением малогабаритной установкой и дальнейшим отбором керна образцов фундамента. Высокая плотность наземного технологического оборудования, наличие электрических кабель-каналов, водосточных коллекторов и других подземных коммуникаций являлись основными проблемами при проведении работ. В рамках опытно-методических работ использовались следующие геофизические методы: градиентометрия, частотное электромагнитное зондирование, электротомография, сейсмоакустика и георадиолокационное зондирование. Бурение алмазной коронкой диаметром 96 мм со съемным керноприемником обеспечивает практически стопроцентный выход керна с минимальной деформацией опорной конструкции. В результате проведенной работы были определены геометрические параметры подземных опор по данным георадиолокации и электротомографии, отобраны образцы фундамента и определены их физико-механические свойства, что в дальнейшем позволило определить марку бетона.

Ключевые слова: фундамент, геофизические исследования, георадиолокация, электротомография, сейсмоакустика, бурение, физико-механические свойства

Для цитирования: Лазурченко А.В., Дмитриев А.Г., Мироманов А.В., Губанов А.Б. Опытно-методические геофизические и буровые работы для изучения геометрии, состояния и свойств скрытых фундаментов // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 50–64. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64>. EDN: XYILPH.

GEOPHYSICS

Original article

**Field trial geophysical and drilling works to study geometry,
state and properties of hidden foundations**

Anton V. Lazurchenko^{a✉}, Alexander G. Dmitriev^b,
Andrey V. Miromanov^c, Aleksey B. Gubanov^d

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

Abstract. Today, most Russian enterprises operate in the plants built in the Soviet era. Therefore, there is a need to assess the condition of workshops with the aim of their further reconstruction. The purpose of the present study is to assess the condition of the load-bearing structures of the chemical plant building including underground foundations. Conducted test pits of some underground reinforced concrete structures of the load-bearing part of the building under study revealed a discrepancy between the actual geometric parameters of the structures and their design characteristics (according to the design documents). Not to stop the production while studying the condition of the supporting structure in the form of hidden foundations, geophysical methods were used in combination with drilling with a small-sized rig and subsequent core sampling of foundation. High density of above-ground technological equipment, the presence of electrical cable channels, drain

© Лазурченко А.В., Дмитриев А.Г., Мироманов А.В., Губанов А.Б., 2025



collectors and other underground utilities were the main challenges of the work. The following geophysical methods were used in experimental and methodological works: gradiometry, frequency electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography, seismic acoustics and ground penetrating radar sounding. Drilling with a 96 mm diameter diamond core bit with a removable core receiver ensures almost 100 % core recovery with minimal deformation of the supporting structure. As a result of the work performed, the geometric parameters of the underground supports were determined using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography data, foundation samples were collected and their physical and mechanical properties were determined, which allowed to identify the concrete grade.

Keywords: foundation, geophysical study, ground penetrating radar, electrical resistivity tomography, seismoacoustics, drilling, physical-mechanical properties

For citation: Lazurchenko A.V., Dmitriev A.G., Miromanov A.V., Gubanov A.B. Field trial geophysical and drilling works to study geometry, state and properties of hidden foundations. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):50-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64>. EDN: XYILPH.

Введение

Изучение скрытых несущих фундаментов (опор) было выполнено на территории одного из цехов химического завода, строительство которого проходило в 1950-х гг. В связи с планируемой реконструкцией объекта возникла необходимость оценки технического состояния и определения реальной несущей способности скрытых опорных элементов. Первоначально обследование осуществлялось методом шурфования на всю глубину заложения опор с непосредственным определением физико-механических свойств бетона и подстилающих грунтов. Однако подобные работы на химическом предприятии без остановки производства были запрещены органами Госгортехнадзора. В связи с этим для изучения подземных конструкций без нарушения их целостности были привлечены геофизические методы, как единственно возможный источник информации, позволяющий определить конструктивные особенности фундамента и состояние подстилающих грунтов без прямого воздействия [1–6].

Работы проводились в три этапа. В ходе первого этапа был произведен анализ такой проектной технической документации, как паспорта, технические журналы, комплекты общестроительных чертежей и т. п., осуществлена фотодокументация поверхностных условий, а также подобраны результаты осмотров, предыдущих обследований и экспертиз ряда опор. Работы второго этапа были нацелены на определение возможностей, оценку эффективности и разработку оптимального комплекса геофизических исследований, обоснование методики и техники их проведения при изучении геометрических характеристик и физико-механических свойств подземных бетонных конструкций. На третьем этапе были проведены контрольное бурение, ультразвуковые измерения (УЗИ) скорости и опреде-

ление прочностных характеристик бетона на образцах фундамента.

Материалы и методы исследования

Изучение скрытых несущих фундаментов (опор) выполнялось на территории цеха химического завода, представляющего собой каркасную конструкцию с несколькими ярусами в виде ванны с бортами наподобие поребрика высотой от 10 до 30 см. Напольным покрытием объекта являлся покровный бетон толщиной 15–25 см. Монолитная опорная конструкция состояла из фундамента (опорная плита и подколонник) и надземной бетонной колонны, входящей на 45–105 см от подошвы покровного бетона в стакан подколонника, конструктивно связанного с опорной плитой.

Изготовление фундамента осуществлялось непосредственно на месте путем заливки бетона марки М200 в опалубку с армирующей сеткой. Затем котлован засыпался песчано-гравийной смесью, уплотнялся и зашивался покровным бетоном марки М100. В результате измерений размеров вскрытых опор были выявлены расхождения между их проектными и реальными геометрическими характеристиками.

Участок работ расположен на возвышенности в междуречье, характеризуется сейсмичностью 9 баллов при глубине залегания грунтовых вод от 12,3 до 12,7 м. Грунтовые воды обладают сильной углекислой и выщелачивающей агрессивностью по отношению к бетону. Тем не менее грунты в основании опор, как и сами опоры, находятся в воздушно-сухом состоянии без серьезного воздействия грунтовых вод, опоры практически не подвержены коррозии. На глубине около 5 м отмечается резкое уменьшение процента мелких фракций в песчано-глинистых отложениях.



С учетом анализа проектной документации, результатов ранее выполненных работ и литературных данных¹⁻³ была сформирована обобщенная априорная петрофизическая модель объекта исследования [7, 8] с указанием физических свойств и геометрических характеристик (рис. 1).

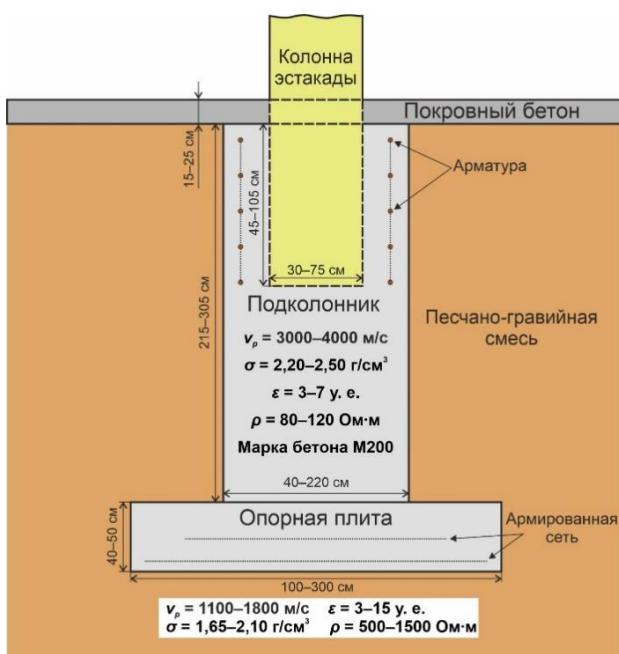


Рис. 1. Априорная петрофизическая модель опоры
Fig. 1. A priori petrophysical model of the support structure

Модель включала в себя вертикальную колонну надземной эстакады, слой покровного бетона без армирования толщиной 15–25 см, вертикальный подколонник высотой от 215 до 305 см и сечением от 40×60 до 120×220 см; а также одну или две опорные плиты толщиной от 40 до 50 см и площадью от 100×100 до 240×300 см. Вся конструкция была засыпана песчано-гравийной смесью и находилась при естественной влажности выше уровня грунтовых вод.

По результатам первого и второго этапов, исходя из задач исследований, были определены основные элементы методики работ: расположение, конфигурация и плотность профилей для каждого метода в зависимости

от расположения наземного оборудования цеха относительно опор. В ходе работы были составлены схемы участков, произведена разбивка профилей и их привязка к обследуемым опорам. Профили ориентированы в широтном (вдоль эстакад) (Пр Ш-0,5) либо меридиональном (Пр М+1,0) направлениях с указанием удаления в метрах от оси опор. Закрепление профилей на местности осуществлялось индикацией точек геофизических наблюдений краской на бетонной поверхности. Расстояние между профилями и шаг пикетов по профилю составляли 0,5 м (рис. 2).

На основании априорной информации о петрофизических характеристиках объекта в соответствии с СП 11-105-97⁴ были опробованы следующие геофизические методы: градиентометрия, частотное электромагнитное зондирование, электротомография, сейсмоакустика и георадиолокационное зондирование. Высокая плотность наземного технологического оборудования, а также наличие электрических кабель-каналов, водосточных коллекторов и других подземных коммуникаций являлись основными проблемами при проведении работ. Именно чрезвычайно высокий уровень электромагнитных промышленных помех, который характеризовался непредсказуемой изменчивостью по частоте, а также во времени и пространстве, не позволил провести площадные работы методами градиентометрии и частотного электромагнитного зондирования.

Георадиолокационные исследования осуществлялись в варианте профильного зондирования. Применялся георадар ОКО-2 с антennыми блоками АБ1700 и АБ700 (цифрами обозначена частота электромагнитного импульса в мегагерцах). Профильные измерения проводились в движении. Точки регистрации по профилю фиксировались метками или колесным датчиком перемещения.

Глубинность исследований методом георадиолокационного зондирования зависит от частоты зондирующих импульсов, удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости пород разреза, а также

¹ ГОСТ 17624–2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. М.: Издательство стандартов, 2014. 16 с.

² Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: учеб. пособие. М., Тверь: Изд-во АИС, 2005. 392 с.

³ Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2017. 240 с.

⁴ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. М.: Изд-во ПНИИИС Госстроя России, 2004. 56 с.

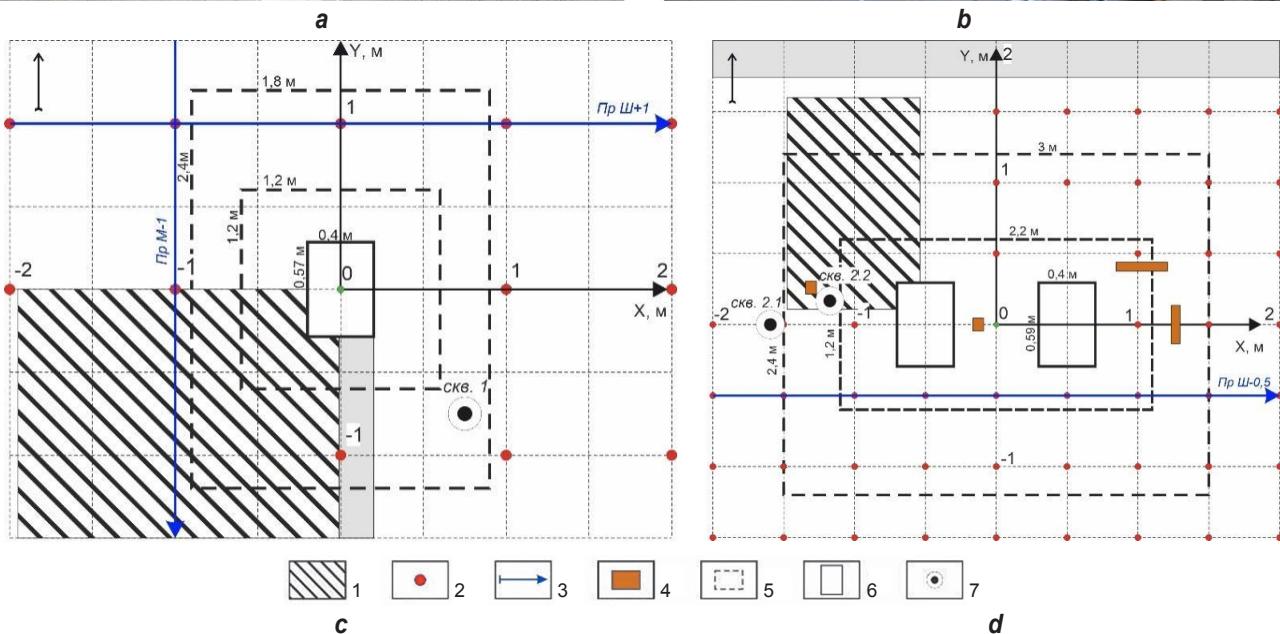
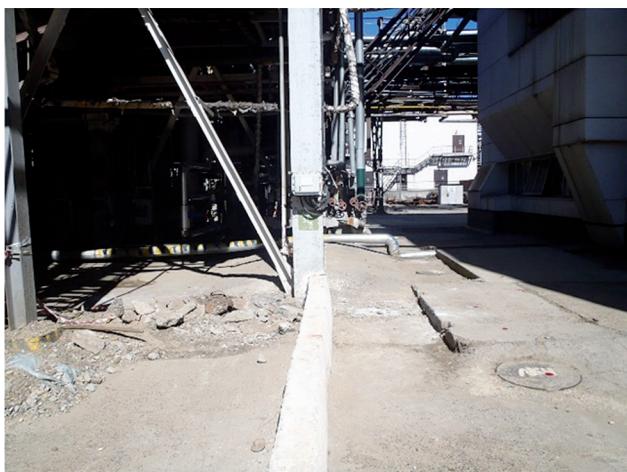


Рис. 2. Участки работ по опорам № 1 и № 2:

а – фотография участка работ по опоре № 1; б – фотография участка работ по опоре № 2;
с – схема участка работ по опоре № 1; д – схема участка работ по опоре № 2

1 – шурф; 2 – индикация на местности; 3 – профили геофизических измерений; 4 – выход металлических труб; 5 – фундамент опоры; 6 – колонна эстакады; 7 – устье скважины

Fig. 2. Worksites for supports no. 1 and no. 2:

a – image of the worksite for the support no.1; b – image of the worksite for the support no.2;

c – diagram of the worksite for the support no. 1; d – diagram of the worksite for the support no. 2

1 – trial pit; 2 – indication on the ground; 3 – geophysical measurement profiles; 4 – metal pipe outlet;

5 – foundation; 6 – overpass column; 7 – wellhead

параметров записи. Чем выше частота регистрируемых колебаний и диэлектрическая проницаемость и ниже удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород разреза, тем выше затухание электромагнитных волн и ниже глубинность.

Значение диэлектрической проницаемости ϵ устанавливалось при записи профиля по умолчанию. Исходя из априорной информации о составе зондируемой среды, ϵ бетона изменяется от 3 до 7 у. е. при изменении влажности от 1 до 10 %. По данным, представле-

ным М.Л. Владовым и М.С. Судаковой³, соотношения между глубинностью исследований и скоростными характеристиками разреза определяются следующими выражениями:

$$V = \frac{30}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1)$$

$$H = \frac{V t_0}{2}, \quad (2)$$

где V – скорость распространения электромагнитных импульсов, см/нс; H – эхо-глубина, м; t_0 – двойное время пробега волны по лучу, нормальному к границе раздела.



Отсюда следует, что точность определения глубины залегания неоднородностей или масштаб глубинной шкалы определяются диэлектрической проницаемостью и точностью ее вычисления. При регистрации данных ε принималась по умолчанию равной 3,7 у. е. На этапе обработки данный параметр уточнялся в программном комплексе GeoScan32 при помощи опции «Гипербола», которая автоматически изменяет масштабную линейку глубин. Реальные значения диэлектрической проницаемости для песчано-гравийной смеси колеблются в пределах 2,8–3,5, а бетона – до 5,3 у. е. при скорости от 15 до 18 см/нс.

Анализ результатов исследования методом георадиолокационного зондирования по опоре, вскрытой шурфом на всю высоту, позволил оптимизировать параметры длины записи и разверток. При длине записи 512 дискретов развертка записи для АБ700 составила 48 нс, а для АБ1700 – 24 нс. Подобные характеристики и параметры записи обеспечили глубинность исследований до 3,5 м при разрешающей способности в пределах 8–10 см.

Обработка и интерпретация материалов георадиолокации, которая осуществлялась в системах GeoScan32 и Prizma-2.5, включала в себя последовательность таких процедур, как⁵:

- 1) редактирование трасс;
- 2) корректировка положения трасс;
- 3) автоматическое выравнивание энергии сигнала (масштабирование);
- 4) регулировка усиления по различным скоростным законам;
- 5) определение сигнала прямого прохождения и его компенсация (вычитание среднего);
- 6) частотная, обратная и медиальная фильтрации;
- 7) выделение огибающей;
- 8) определение диэлектрической проницаемости и построение глубинного разреза.

В результате проведенной обработки строились временные и глубинные разрезы.

Исследование состояния фундаментов сооружений и подстилающих грунтов электроразведочными методами является распространенной практикой. Изучение разреза по УЭС в комплексе с другими геофизическими и инженерно-геологическими методами позволяет определить литологический состав и оценить состояние грунтов [9–12]. При ис-

следовании скрытых фундаментов, представленных железобетонными конструкциями, которые находятся в естественной влажности в песчано-гравийной высокоомной среде, по данным электроразведки можно предположить коррозийное состояние бетона и насыщенность влагой всей конструкции или какую-либо отдельной ее части [13–16].

Исследование методом электротомографии было выполнено электроразведочной станцией «Скала 64К15». Основные параметры генерируемого тока при выходном напряжении источника 200 В: продолжительность импульса тока – 200 мс, паузы – 20 мс. Измерения выполнены электроразведочной установкой Шлюмберже [17]. Заземление осуществлялось поверхностными губчатыми электродами, насыщенными солевым раствором, при этом сопротивление на электродах варьировалось в пределах 2–40 кОм.

При проектировании расстановки электроразведочной системы основной проблемой являлось ограниченное пространство в районе опор, что не позволяло добиться глубинности измерений более 3,5 м. Для опоры № 1 расстояние между электродами составило 0,4 м, общее количество электродов на один профиль – 32. Данная геометрия измерений обеспечила глубинность исследований до 3 м от поверхности. Для опоры № 2 расстояние между электродами составляло 0,3 м, общее количество электродов на один профиль – 64. При данной геометрии измерений глубинность исследования достигала 3,5 м от поверхности. По результатам выполненных измерений проводилась 2D-инверсия электроразведочных данных в программе ZondRes2D.

Одной из важнейших задач в строительстве является обеспечение требуемой несущей способности фундамента. Ведущими методами, нацеленными на определение геометрических параметров подземных конструкций и физико-механических свойств бетона и подстилающих опоры отложений, являются сейсмоакустические методы [18–20]. Методика и техника их проведения, а также применяемая аппаратура регламентировалась СП 11-105-97⁴.

Сейсморазведочные работы в модификации продольно-непродольного профилирования позволили на линии общей средней точки, проходящей через ось колонны в меридиональ-

⁵ Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.



ном направлении (профиль Пр М0), достичь кратности накоплений, равной 40. Работы проводились 24-канальной станцией «Лакколит 24-М4» с коммутатором каналов на профилях длиной по 11,5 м при расстоянии между сейсмоприемниками и пунктами возбуждения 0,5 м. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось динамическим воздействием при 10–15 накоплениях. Обработка материалов проводилась в рамках обрабатывающей системы RadExPro. Анализ полученных результатов свидетельствует о чрезвычайно высоком уровне шумов (рис. 3, а), который характеризуется интенсивной изменчивостью не только во времени и частоте, но и в пространстве. Отношение сигнал/помеха на сейсмограммах не превышает 0,5. На временных разрезах (рис. 3, б) конструкция колонны в волновом поле не отражается совсем. При этом на временах ≈ 6 и 14 мс прослеживаются неустойчивые отражающие горизонты, обусловленные внутренними границами внутри рыхлых отложений.

Бурение скважин осуществлялось малогабаритной установкой «Опёнок» с высотой мачты, составляющей 3 м. Бурение было проведено комплексом со съемным керноприем-

ником диаметром HQ (от англ: high quality – высокое качество) (96 мм) при скорости вращения бурового снаряда до 550 об/мин с нагрузкой на забой 500–1000 кгс. Основным достоинством комплекса является возможность одновременной с процессом отбора керна установки обсадной колонны. Для охлаждения породоразрушающего инструмента и выноса шлама со скважины использовался буровой раствор с химией ULTRA.

Ликвидация скважин осуществлялась путем закачки под давлением 15 атмосфер цементного раствора плотностью 1,75–1,80 г/см³ в процессе поднятия бурового инструмента до полного заполнения скважин, формирования гидроизоляции и дополнительной «подушки» в зоне поглощения под опорными плитами.

В пределах опоры № 1 была пробурена на склонная скважина глубиной 4,3 м (рис. 4, а). Выбор точки заложения скважины осуществлялся исходя из проектной документации по опоре и корректировался по материалам исследования методом георадиолокационного зондирования (см. рис. 1, б). Скважина заложена в 75 см от центра опоры с углом наклона в продольной плоскости 85 градусов.

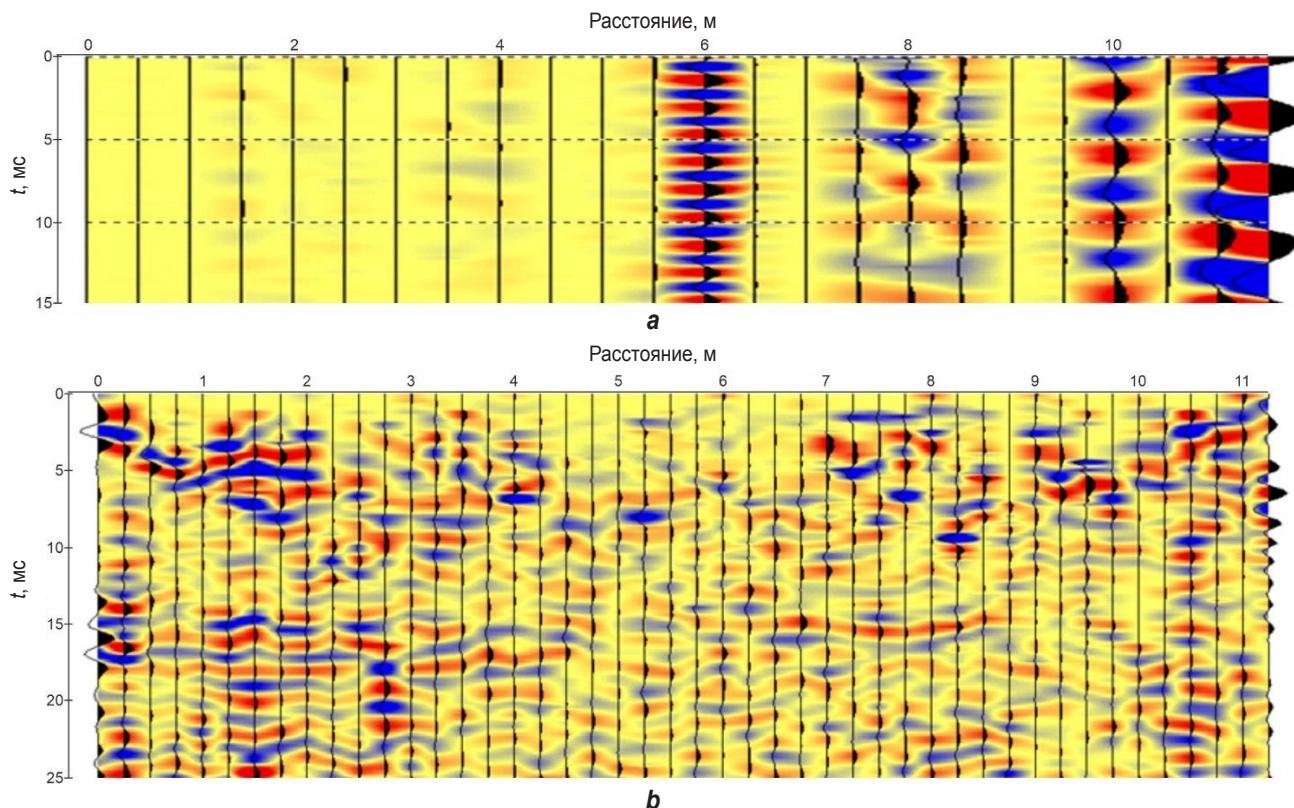


Рис. 3. Результаты сейсморазведочных работ, осуществленных по профилю Пр М0 (опора № 1):
а – характер помех; б – временной разрез по линии общей средней точки

Fig. 3. Results of seismic surveys conducted on the profile Пр М0 (support structure no.1):
a – nature of interference; b – time section along the line of the common midpoint



Наклонное бурение было обусловлено невозможностью размещения буровой установки под эстакадой. Отбор керна диаметром 63 мм производился вдоль всего ствола скважины. В интервале песчано-гравийной смеси выход керна в виде чистого галечника диаметром от 0,5 до 4 см составил 50–65 %. На глубине 1,2 м буровой снаряд под углом 5 градусов вошел в тело подколонника, предварительно вскрыв деревянную опалубку. В интервале глубин 1,2–3,4 м (интервал бетонной опоры) выход керна составил 100 %. Об этом свидетельствует отсутствие затираний между образцами керна. Подобное осложнение связано с отклонением снаряда по направлению вращения, что в дальнейшем обусловило бурение только вертикальных скважин.

В пределах опоры № 2 пробурены две скважины глубиной 4,3 и 3,4 м (рис. 4, *b*). Бурение скважины 2.1 осуществлялось в непосредственной близости от опоры с целью извлечения качественных проб песчано-гравийной смеси. В интервале от подошвы покровного бетона до забоя бурение проводилось укороченными рейсами с минимальной подачей промывочной жидкости, что обеспечило 80 % выхода керна и оценку несущей способности грунта под опорной плитой. Скважина 2.2, пробуренная вдоль подколонника, обеспечила отбор керна из опорной плиты, подготовку проб для изучения

физико-механических свойств бетона и определения точной глубины заложения опоры.

Для оперативного изучению состояния и размеров опор был использован акустический метод (SIT, от англ.: Sonic Integrity Testing). Это метод инженерной сейсмоакустики, в основу которого положено изучение распространения упругих колебаний в толще бетонной конструкции, возбуждаемых ударным способом на ее поверхности. Работы выполнялись измерителем длины свай ИДС-1, который предназначен для определения скоростных и геометрических характеристик бетонных конструкций. Наблюдая отражения от границ конструкция/грунт до внутренних дефектов или неоднородностей, можно сделать заключение об их размерах, сплошности и однородности.

Измерения проводились в трех-пяти точках по периметру подколонников при 5–7 накоплениях. Длина опор вычислялась исходя из измеренной скорости распространения продольной волны на вскрытых шурфами поверхностях фундамента в материале опор и измеренного прибором времени прихода отраженной волны от границы опора/грунт. В дальнейшем значения скоростей в бетоне опор корректировались по данным бурения. Так, скорость на базе 1 м на вскрытой части фундамента опоры № 1 составила 3240–3333 м/с, а после корректировки по данным бурения – 3118 м/с.

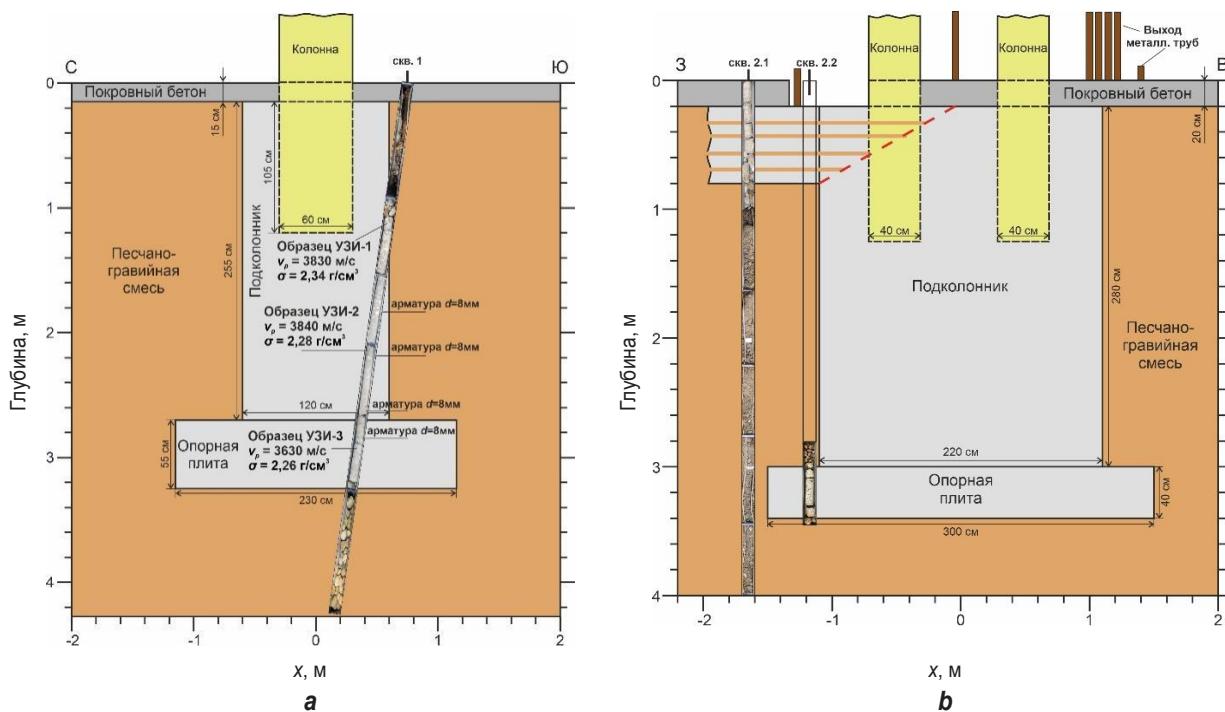


Рис. 4. Интерпретационные физико-геологические модели опоры № 1 (а) и опоры № 2 (б)
Fig. 4. Interpretation physical-geological models of the support no. 1 (a) and support no. 2 (b)



Из керна бетона были выпилены цилиндры высотой 39–65 мм, по которым определялись скоростные и плотностные характеристики бетона. Измерения производились в соответствии с ГОСТ 17624–2012¹ с помощью ультразвукового сейсмоскопа УК-10ПМС методом прозвучивания. Плотность бетона определялась методом гидростатического взвешивания. Прямые определения предела прочности на сжатие осуществлялись согласно ГОСТ 28570–90⁶ в сертифицированной лаборатории с использованием испытательного пресса ТП-1-1500.

Результаты исследования и их обсуждение

Участок в районе опоры № 1 характеризовался беспрецедентной изменчивостью поверхностных условий, что существенно затрудняло обработку и интерпретацию данных. На площади работ, составляющую 3×3 м, были выявлены как минимум 4–5 участков с различным составом и свойствами поверхностей (бетон различной толщины, межплитные швы, перепады альтитуд, засыпанный строительным мусором шурф, насыпь песчано-гравийной смеси, бордюры), а также наличие промышленного оборудования, которое затрудняет прямолинейную прокладку профилей требуемой длины. Кроме того, по люкам и сливной решетке определялись 2 коллектора, существенно влияющие на результаты всех геофизических методов.

Одним из основных факторов, влияющих на качество радарограмм, является стабильность линии наблюдения. Так, изменение угла наклона антенны на 1–3 градуса при глубине залегания изучаемой границы (3 м) ведет к скачкообразному смещению точки отражения на 5,1–15,6 см в горизонтальной плоскости. Естественно, в этом случае отражающая точка трансформируется в площадку с непредсказуемыми параметрами. Это иллюстрируется результатами исследования методом георадиолокационного зондирования по Пр М-1.0 (рис. 5, а). Северная часть профиля располагается на ровной бетонной площадке, центр опоры расположен на пикете 0. На радарограмме по срыву корреляции горизонтальных осей синфазности на пикетах -0,45 и +0,5 однозначно выделяются кромки подколонника, размер

которого составляет 0,95 м. Подколонник практически соответствует проектному. На глубине 2,4 м на пикете -1,2 м фиксируется гиперболическая ось синфазности, которая обусловлена точкой дифракции, отождествляемой с верхней кромкой опорной плиты. Если считать опорную плиту симметричной, ее размеры (2,4 м) соответствуют проектным. Контуры элементов опоры обозначены красными стрелками. Южная часть профиля совершенно не интерпретируется. Наличие шурфа, засыпанного строительным мусором, и насыпь песчано-гравийной смеси ведут к резким изменениям рельефа профиля и, как следствие, к усложнению волновой картины.

Данные электроразведки методом электротомографии позволяют локализовать верхнюю часть скрытой железобетонной конструкции и проследить за тем, как распространяется электрическое поле по параметру УЭС. Тем не менее определить границы с точностью до 10 см не представляется возможным. По результатам инверсии данных электротомографии по Пр Ш+1 (рис. 5, б) подколонник выделяется аномалией пониженных значений УЭС в пределах 60–120 Ом·м. Подколонник однороден, в верхней части наблюдается область его сочленения с опорой. Пониженное сопротивление обусловлено наличием электронно-проводящей арматуры внутри подколонника. Из-за ограничения в размере электроразведочной установки глубинность не превысила 2,5 м. Области со значениями выше 1000 Ом·м приурочены в основном к системе ливневой канализации. Значения УЭС в пределах 200–1000 Ом·м относятся к песчано-гравийной смеси.

На участке опоры 2 рельеф местности однороден, перепадов высот нет. В отличие от опоры 1, присутствует высокая плотность промышленного оборудования и разного рода трубопроводов, которые препятствуют проведению измерений. К подземным коммуникациям относится кабель-канал, простирающийся вдоль эстакады в широтном направлении на расстоянии 0,7 м от колонны эстакады.

По данным георадиолокации, на профиле Ш-0,5 (см. рис. 5, а) отчетливо проявляются границы подколонника на пикетах -1,2 м и в диапазоне +1,2...+1,35 м. Смещение правой стороны подколонника на радарограмме связано с наличием металлической трубы, кото-

¹ ГОСТ 28570-90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций. М.: Издательство стандартов, 1990. 14 с.

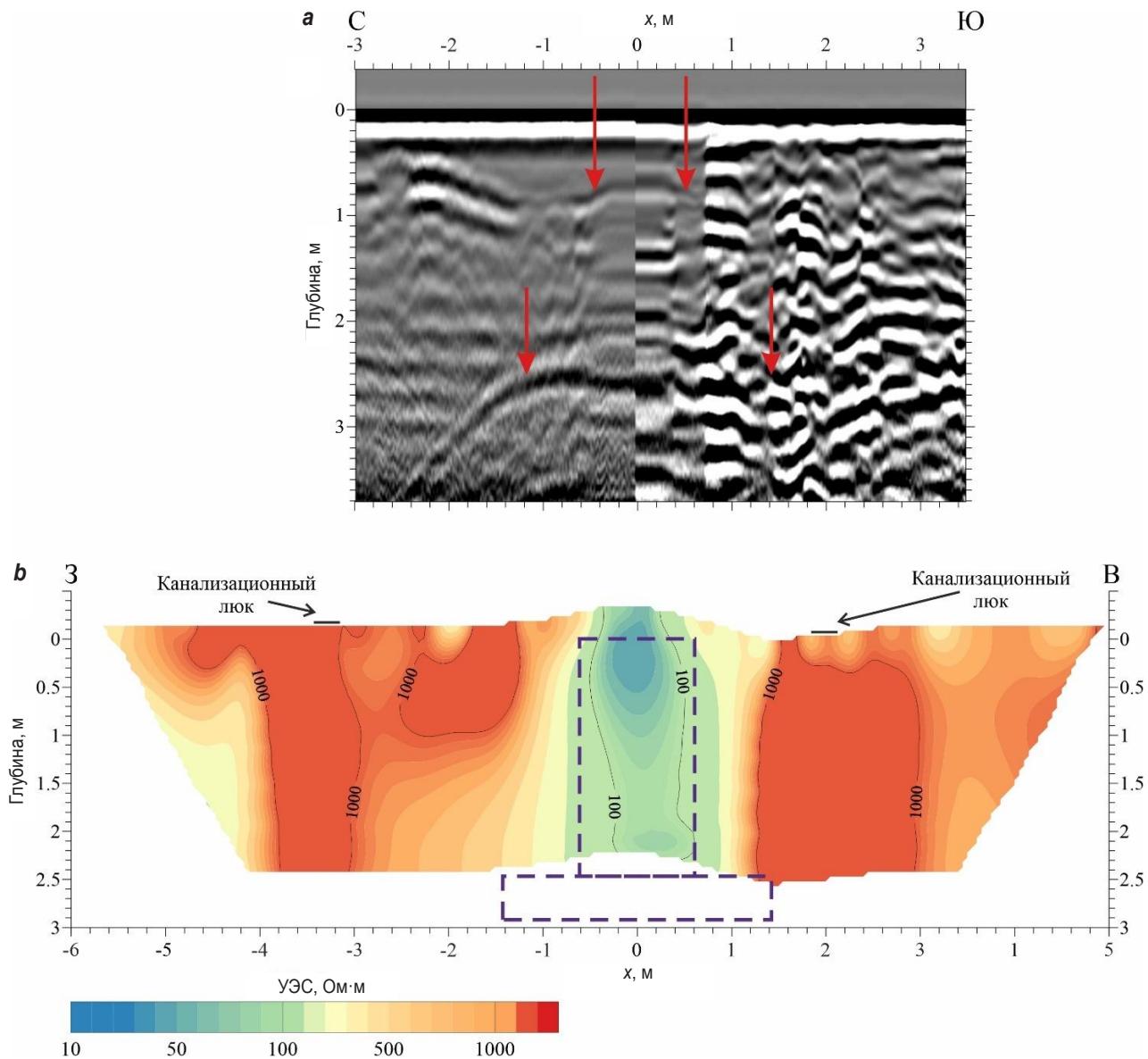


Рис. 5. Результаты исследования опоры № 1 методом георадиолокационного зондирования (а) и методом электротомографии (б)

Fig. 5. Study results of the support no. 1 by the method of ground penetrating radar sounding (a) and the method of electrical resistivity tomography (b)

рая имеет интенсивную параболическую аномалию. Таким же образом прослеживается металлическая труба на пикете -0,1 м. В левой части георадиолокационной картины в районе пикетов от -3,5 до -1,2 наблюдаются оси синфазности до глубины 0,8 м. Они относятся к переслаиванию бетона и песчано-гравийной смеси, которые в дальнейшем были подтверждены бурением скважины 2.1 (см. рис. 4, б). Далее на глубине 1,2 м прослеживается отраженная граница (коричневая линия), за которой следует однородная картина. Вероятнее всего, это относится к кабель-каналу.

По результатам инверсии данных электротомографии профиля Ш-0,5 построен разрез

УЭС (рис. 6, б). При данной конфигурации электроразведочного профиля длиной 18,9 м удалось провести измерения вдоль трех колонн эстакады, каждая из которых выделяется затянутыми низкоомными аномалиями. На пикете -6,5 м границы подколонника определяются резким скачкообразным изменением сопротивления в продольном направлении. Ситуация на других двух опорах отличается, что связано с наличием возле колонн проводящего объекта в виде металлической трубы, которая отражается интенсивной низкоомной аномалией. На центральной опоре в районе от 0 до -1 м прослеживается повышение значений УЭС, что может говорить о нарушении железобетонной



конструкции. По левую сторону от центральной опоры (опора 2) находится высокоомная аномалия (более 1000 Ом·м), которая простирается на глубину до 1 м и соответствует переслаиванию бетона с песчано-гравийной смесь. Дифференцировать каждый слой бетона по мощности не является возможным в связи с недостаточной разрешающей способностью. В данном случае глубина исследования ограничена наличием электрического кабель-канала, который является так называемым экраном для электромагнитного поля и составляет 1,2–1,3 м от поверхности. Для детальной оценки изменчивости характеристик опор результаты измерений сейсмоакустических и прочностных свойств были сведены в таблице.

Анализ приведенных в таблице данных свидетельствует о значительной разнице сейсмоакустических и прочностных свойств бетона в опорах. Несмотря на это статистический анализ позволил получить следующие корреляционные уравнения между прочностью бетона R , МПа, скоростью V , м/с, и акустической жесткостью $\gamma = V\sigma$, кг/м²с:

$$R = 0,02V - 50,56; \quad (3)$$

$$R = 7,42\gamma - 38,89. \quad (4)$$

Данные уравнения с погрешностью 5–8 % соответствуют уравнению (для бетона В 7-35)⁶:

$$R = 0,016V - 21,3. \quad (5)$$

Дополнительно по методике, разработанной в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете⁷, которая

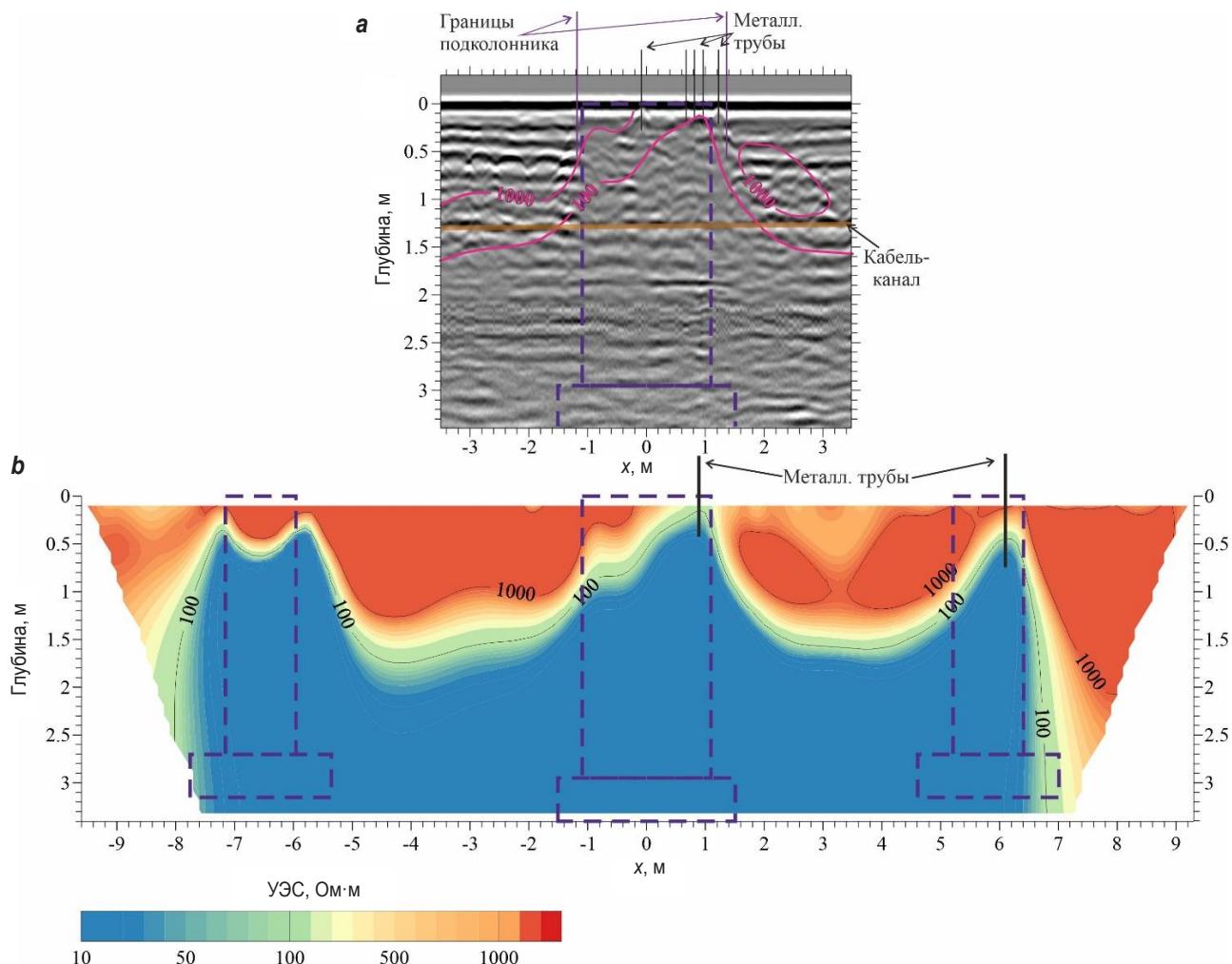


Рис. 6. Результаты исследования опоры № 2 методом георадиолокационного зондирования (а) и методом электротомографии (б)

Fig. 6. Study results of the support no. 2 by the method of ground penetrating radar sounding (a) and the method of electrical resistivity tomography (b)

⁷ Бегинян Э.А., Ушаков С.А., Понявина Н.А., Емельянов Д.И. Техническая эксплуатация, содержание и обследование объектов недвижимости: учеб. пособие. Воронеж: Изд-во ГАСУ, 2013. 108 с.



Результаты петрофизических измерений Petrophysical measurement results

Маркировка образца	Приведенная прочность, МПа	Скорость, м/с	Плотность, г/см ³	Акустический импеданс, 10 ⁶ кг/м ² с	Скорость по измерителю длины свай, м/с
Скважина 1					
УЗИ-1	26,4	3834	2,34	8,97	
Образец 1/1	26,4	—	—	—	
Образец 2/1	21,4	—	—	—	
Образец 3/1	29	—	—	—	
УЗИ-2	30,2	3843	2,28	8,76	—
Образец 4/1	31,4	—	—	—	
Образец 5/1	18	—	—	—	
УЗИ-3	20,1	3634	2,26	8,21	
Образец 6/1	22,2	—	—	—	
Среднее	27,2	3770	2,29	8,65	3330
Скважина 2.2					
Образец 2/2	38,6	4609	2,29	10,55	
Образец 3/2	48,4	4661	2,46	11,47	—
Образец 4/2	57	4612	2,23	10,28	
Образец 5/2	30,5	4382	2,32	10,17	
Среднее	43,6	4585	2,34	10,64	3014

применима в случае сквозного прозвучивания, определена прочность бетона R в кг/см²:

$$R = K \cdot V_{\text{сke}}^{3,75}, \quad (6)$$

где $V_{\text{сke}}$ – скорость прохождения ультразвука при сквозном прозвучивании; K – ориентировочный градировочный коэффициент. Тяжелый бетон неизвестной технологии изготовления и выдерживания с влажной поверхностью имеет значение $K = 1,64^7$. В соответствии с расчетами при скорости продольных волн 3,77 (опора № 1) и 4,58 км/с (опора № 2), прочность бетона составляет 23,8 и 49,1 МПа (показатель соответствуют бетонам марки М200 и М400), что на 10–12 % отличается от прямых определений прочности на сжатие, но все равно соответствует классу бетона В20–В30.

Следует отметить, что результаты, полученные с помощью применения различных расчетных методов, достаточно близки. Тем не менее их нельзя считать представительными, поскольку для статистически значимых заключений и расчета многофакторных корреляционных уравнений необходимо проведение парных определений петрофизических характеристик не менее чем на 9 объектах⁷.

Систематизация результатов исследований позволила сформировать интерпретационные модели двух опор (см. рис. 4), оценить эффективность применения геофизических методов и обосновать методику комплексных геофизических исследований.

По результатам исследования, проведенного с помощью метода георадиолокационного зондирования, определены геометрические размеры подколонников и опорной плиты (в благоприятных условиях). С помощью измерителя длины свай ИДС-1 определены скоростные характеристики бетонных конструкций, глубина их заложения, а также оценена их сплошность и однородность. Так, на опоре № 2 по аномально низким значениям скоростных характеристик выявлена неоднородность, впоследствии подтвержденная бурением и проведенной электротомографией. Данная неоднородность обусловлена изменением конструкции верхней части колонноприемника путем дополнительной заливки набетонки в виде переслаивания бетона и песчано-гравийной смеси.

Заключение

Анализ полученных в ходе проведенного исследования результатов применения геофизических методов при изучении скрытых фундаментов многоярусных конструкций позволил сделать вывод о том, что получаемая детальная информация о структуре и свойствах фундаментов обеспечивает оценку состояния и прогноз устойчивости опор без нарушения их целостности. Частотное электромагнитное зондирование, поверхностная сейсморазведка и градиентометрия в условиях интенсивных



промышленных помех не обеспечивают требуемой точности определения геометрических размеров и прочностных свойств опорных конструкций. Основными методами в комплексе работ по изучению опорных конструкций следует считать бурение, георадиолокационное зондирование, а также сейсмоакустические измерения скоростных и геометрических характеристик бетонных конструкций.

По данным, полученным при использовании метода электротомографии, исследуемая конструкция фундамента выделена под покровным бетоном вертикально затянутыми низкоомными аномалиями. Однако определить границы опоры с точностью до 10 см с помощью данной методики невозможно. Метод электротомографии целесообразно использовать для оценки однородности колонны, коррозийной агрессивности и влагонасыщенности среды.

Анализ радарограмм свидетельствует о возможности определять при помощи метода георадиолокационного зондирования геометрические размеры подколонников. При точной привязке профилей положение подколонника определяется практически однозначно с погрешностью в первые сантиметры, что позволяет корректно задать местоположение скважин. В благоприятных условиях (однородные поверхности, отсутствие перепадов высот на профилях, удаленных на 0,5–2 м от опор) фиксируются гиперболические оси синфазности, обусловленные угловыми точками опорных плит. Георадиолокационные зондирования целесообразно проводить в движении по выровненным поверхностям с двумя антennами, а именно: высокочастотной (1,2–1,7 ГГц) при развертке от 24 до 48 нс (для изучения характеристик покровного бетона и расположения арматуры) и среднечастотной (700–900 МГц) при развертке от 48 до 72 нс

(для изучения разреза на глубину от первых десятков сантиметров до 5 м). Достаточным является проведение наблюдений по 4–6 ортогональным профилям длиной по 3–5 м в широтном и меридиональном направлениях на расстоянии 0,5–1,5 м от центра опоры с обязательным учетом рельефа профилей. Для увеличения точности определения геометрических характеристик подземных конструкций возможна детализация путем проведения точечных зондирований в режиме старт/стоп.

Алмазное бурение диаметром HQ (96 мм) со съемным керноприемником обеспечивает практически стопроцентный выход керна с минимальной деформацией бетонной основы со щадящим выбуриванием металлической арматуры и любого заполнителя. Весь гравий, даже самых мелких фракций, в случае использования подобной технологии как в бетоне, так и в песчано-гравийной смеси, не вымывается и не отделяется от керна, что обеспечивает отбор проб для любых петрофизических и гранулометрических анализов без ограничений. Данные петрофизических измерений свидетельствуют о наличии устойчивых корреляционных связей, что позволяет определять физико-механические свойства бетона по наземным сейсмическим наблюдениям.

Поверхностные 2D сейсмические наблюдения из-за интенсивных помех не позволили получить данные о геометрических и скоростных характеристиках бетонных конструкций. Только работы с измерителем длины свай обеспечивают определение глубины заложения опор и оценку их состояния. При условии реализации трехкомпонентных сейсмических наблюдений скважина/поверхность возможно изучение геометрических размеров и динамических (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, плотность) характеристик бетона в естественном залегании.

Список источников

1. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Степанов Ю.И., Прийма Г.Ю., Чугаев А.В. Комплексирование инженерно-геофизических методов при исследованиях фундаментов // Разведка и охрана недр. 2006. № 12. С. 32–36. EDN: KUYFRD.
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation // Journal of Geophysics and Engineering. 2007. Vol. 4. Iss. 1. P. 94–103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Gutiérrez-Martín A., Yenes J.I., Fernández-Hernández M., Castedo R. Stabilization methodology in foundation soils by ERT-3D application in Estepona, South Spain // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 10. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/app11104455>.
4. Аузин А.А., Карагаев Д.Д. Обследование зданий и сооружений геофизическими методами // Георадар 2023: сборник тезисов науч.-практ. конф. (г. Москва, 22–24 марта 2023 г.). М.: Издательский дом «Академия естествознания», 2023. С. 90–94. EDN: CGUUJM.



5. Колесников В.П., Пригара А.М., Татаркин А.В. Комплексные геофизические исследования состояния грунтов основания и фундаментов инженерных сооружений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 11. С. 89–91. EDN: OIGDZD.
6. Гуляев А.Н., Осипова А.Ю., Щапов В.А. Неоднородность грунтов в основании фундаментов как основная причина повреждений зданий в Екатеринбурге // Архитектон: известия вузов. 2011. № 4. С. 187–193. EDN: ONAFLV.
7. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 126 с.
8. Нерадовский Л.Г. Оценка теплового состояния криолитозоны России методами электромагнитного зондирования: монография. М.: Издательский дом «Научное обозрение», 2014. 333 с. EDN: VZUFFN.
9. Зайцева Н.М., Исабекова Б.Б., Клецель М.Я. Определение параметров грунта для расчета его удельного электрического сопротивления // Электротехника. 2015. № 5. С. 41–47. EDN: TODIKP.
10. 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 подтопляемой 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.
11. Olomo K.O. Pre-foundation studies using vertical electrical sounding and soil sample analysis // Journal CleanWAS. 2023. Vol. 7. Iss. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.26480/jcleanwas.01.2023.01.07>.
12. Лаломов Д.А., Глазунов В.В. Оценка коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе совместной интерпретации данных методов сопротивления и георадиолокации // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 3–12. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.3>. EDN: YQCXLP.
13. Olayanju G.M., Mogaji K.A., Lim H.S., Ojo T.S. Foundation integrity assessment using integrated geophysical and geotechnical techniques: case study in crystalline basement complex, southwestern Nigeria // Journal of Geophysics and Engineering. 2017. Vol. 14. Iss. 3. P. 675–690. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa64f7>.
14. Gryaznova E.M. Geophysical methods in survey and geotechnical monitoring of foundations and underlying soils // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021 (Novosibirsk, 11–14 May 2021). Cham: Springer Nature, 2021. Vol. 2. P. 1443–1449. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5>.
15. Пичугина А. Н., Ковин О.Н. Оценка возможностей метода электротомографии для локации подземных бетонных трубопроводов на основе физического и математического моделирования // Теория и практика разведочной и промыслововой геофизики: сборник научных трудов IX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 18–19 ноября 2021 г.). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2021. Т. 4. С. 140–146. EDN: UUOBKD.
16. Коринько И.В., Пилиграмм С.С., Эпоян С.М., Смирнова Г.Н., Хадимаг А.А. Комплексная диагностика состояния сетей водоснабжения и водоотведения // Водоочистка. 2016. № 4. С. 29–33. EDN: WARBEP.
17. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 43–47. EDN: IIRRUJ.
18. Дмитриев А.Г., Мироманов И.А., Тирский О.Н. Использование геофизических методов при обследовании толстых бетонных покрытий // Российский геофизический журнал. 2006. № 43-44. С. 143–146. EDN: ZSZKGP.
19. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств несkalьных грунтов // Екатеринбург: Изд-во УГГТА, 1997. 220 с.
20. Гинодман А.Г., Голосов В.П., Гранит Б.А. Опыт изучения малоглубинных объектов сейсморазведкой // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 77–85. EDN: QGRYSD.

References

1. Sanfirov I.A., Yaroslavtsev A.G., Stepanov Yu.I., Priima G.Yu., Chugaev A.V. Integration of engineering and geophysical methods in foundation study. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. (In Russ.). EDN: KUYFRD.
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2007;4(1):94-103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Gutiérrez-Martín A., Yenes J.I., Fernández-Hernández M., Castedo R. Stabilization methodology in foundation soils by ERT-3D application in Estepona, South Spain. *Applied Sciences*. 2021;11(10)1-19. <https://doi.org/10.3390/app11104455>.
4. Auzin A.A., Karataev D.D. Inspection of buildings and structures by geophysical methods. In: *Georadar 2023: sbornik tezisov nauch.-prakt. konf. = Georadar 2023: collected abstracts of the scientific and practical conference*. 22–24 March 2023, Moscow. Moscow: Izdatel'skii dom "Akademiya estestvoznanii"; 2023, p. 90-94. (In Russ.). EDN: CGUUJM.
5. Kolesnikov V.P., Prigara A.M., Tatarkin A.V. Comprehensive geophysical studies of the state of foundation soils and engineering structure foundations. *Geologiya i poleznye iskopаемые Zapadnogo Urala*. 2011;11:89-91. (In Russ.). EDN: OIGDZD.
6. Gulyaev A.A., Osipova A.Yu., Shchapov V.A. Inhomogeneity of soils in the foundation base as the main cause of building damage in Yekaterinburg. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2011;4:189-193. (In Russ.). EDN: ONAFLV.
7. Finkel'shtein M.I., Kutev V.A., Zolotarev V.P. *Application of subsurface radar sounding in engineering geology*. Moscow: Nedra; 1986, 126 p. (In Russ.).
8. Neradovskii L.G. *Assessing thermal state of Russian cryolithozone using electromagnetic sounding methods*. Moscow: Izdatel'skii dom "Nauchnoe obozrenie"; 2014, 333 p. (In Russ.). EDN: VZUFFN.



9. Zaitseva N.M., Isabekova B.B., Kletsel' M.Y. Determination of soil parameters to calculate its electrical resistivity. *Elektrotekhnika*. 2015;5:41-47. (In Russ.). EDN: TODIKP.
10. Shkirya 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.
11. Olomo K.O. Pre-foundation studies using vertical electrical sounding and soil sample analysis. *Journal CleanWAS*. 2023;7(1):1-7. <https://doi.org/10.26480/jcleanwas.01.2023.01.07>.
12. Lalomov D.A., Glazounov V.V. Collaborative interpretation of the data obtained by resistivity and ground penetrating radar methods for assessing sandy clay soil permeability. *Journal of Mining Institute*. 2018;229:3-2. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.3>. EDN: YQCXLP.
13. Olayanju G.M., Mogaji K.A., Lim H.S., Ojo T.S. Foundation integrity assessment using integrated geophysical and geotechnical techniques: case study in crystalline basement complex, southwestern Nigeria. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2017;14(3):675-690. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa64f7>.
14. Gryaznova E.M. Geophysical methods in survey and geotechnical monitoring of foundations and underlying soils. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. 11–14 May 2021, Novosibirsk. Cham: Springer Nature; 2021, vol. 2, p. 1443-1449. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5>.
15. Pichugina A.N., Kovin O.N. Evaluation of electrical resistivity tomography feasibility to locate underground concrete pipelines based on physical and mathematical modeling. In: *Teoriya i praktika razvedochnoi i promyslovoi geofiziki: sbornik nauchnykh trudov IX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Theory and practice of exploration and production geophysics: collected scientific papers of the 9th International Scientific and Practical Conference*. 18–19 November 2021, Perm. Perm: Perm State University; 2021, vol. 4, p. 140-146. (In Russ.). EDN: UUOBKD.
16. Korinko I.V., Piligrann S.S., Epoyan S.M., Smirnova G.N., Khadimov A.A. Complex diagnostics of a condition of networks of water supply and water disposal. *Vodoochistka*. 2016;4:29-33. (In Russ.). EDN: WARBEP.
17. Bobachev A.A., Modin I.N. Electrical tomography using standard geoelectric units. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2008;1:43-47. (In Russ.). EDN: IIRRUJ.
18. Dmitriev A.G., Miromanov I.A., Tirskei O.N. Using geophysical methods in surveying thick concrete coatings. *Rossiiskii geofizicheskii zhurnal*. 2006;43-44:143-146. (In Russ.). EDN: ZSZKGP.
19. Bondarev V.I. *Seismic method for determining physical and mechanical properties of non-rocky soils*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 1997, 220 p. (In Russ.).
20. Ginodman A.G., Golosov V.P.E., Granit B.A. Using seismic surveys to study construction facilities having shallow foundations. *Vestnik MGSU*. 2013;6:77-85. (In Russ.). EDN: QGRYSD.

Информация об авторах / Information about the authors



Лазурченко Антон Витальевич,
аспирант,
младший научный сотрудник департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ alazurchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>
Anton V. Lazurchenko,
Postgraduate Student,
Junior Researcher of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ alazurchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>



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>



Мироманов Андрей Викторович,
 кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
 научный сотрудник департамента инженерной геологии,
 институт «Сибирская школа геонаук»,
 Иркутский национальный исследовательский технический университет,
 г. Иркутск, Россия,
 mav@istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-0678-3733>

Andrey V. Miromanov,
 Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
 Researcher of the Department of Engineering Geology,
 Siberian School of Geosciences,
 Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,
 mav@istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-0678-3733>



Губанов Алексей Борисович,
 ведущий инженер департамента геофизики,
 институт «Сибирская школа геонаук»,
 Иркутский национальный исследовательский технический университет,
 г. Иркутск, Россия,
 gubanovab@ex.isu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-8035-9344>

Aleksey B. Gubanov,
 Leading Engineer of the Geophysics Department,
 Siberian School of Geosciences,
 Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,
 Irkutsk, Russia,
 gubanovab@ex.isu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-8035-9344>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.В. Лазурченко – проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.Г. Дмитриев – разработка концепции, курирование данных, валидация результатов, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.В. Мироманов – проведение исследования, формальный анализ.

А.Б. Губанов – проведение исследования, визуализация, формальный анализ.

Anton V. Lazurchenko – investigation, visualization, writing – original draft, writing – editing.

Alexander G. Dmitriev – conceptualization, data curation, validation, writing – original draft, writing – editing.

Andrey V. Miromanov – investigation, formal analysis.

Aleksey B. Gubanov – investigation, visualization, 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 03.02.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принятая к публикации 24.02.2025.

The article was submitted 03.02.2025; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 24.02.2025.



GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

EDN: VQFHHZ

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-65-76



Analysis of natural water resources formation and distribution conditions in Central Ethiopia

Agegnehu K. Yoshe^a, Larisa I. Auzina^b✉

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

^aArba Minch University, Arba Minch, Ethiopia

Abstract. Water is the most important natural resource that ensures Earth's ecological system operation. The variability of the resource potential of the hydrosphere has a significant, if not decisive, impact on the socio-economic development of the world including Ethiopia in general and its central regions in particular where surface water is the main source of water supply. Growing urbanization, industrialization and agricultural development have increased the demand for multipurpose water supply in the agricultural, industrial and energy sectors of Ethiopia. Due to the increased water demand during the dry seasons of the year the country faces severe water shortages, while the amount of surface water during the rainy seasons quite accommodates modern demands. The purpose of this study is to analyze the natural formation and distribution conditions of surface and groundwater resource potential in Central Ethiopia as well as to identify the most promising sites for groundwater prospecting and exploration. Having processed and analyzed the materials using Google Earth Engine cloud technologies and a number of software packages, it was determined that the structural and tectonic development of the territory caused by the region's confinement to the East African Rift Zone, plays a decisive role in the formation of natural conditions both in Ethiopia as a whole and in its central part in the distribution of natural water resources. The relief, climatic features, and main geomorphological and geological structures are the result of past and ongoing tectonic processes. Understanding of surface and groundwater formation and distribution conditions in the region, significant volume of source material, and the use of modern processing means create the basis for a quantitative assessment of surface water resources and the delineation of the most water-abundant areas of the subsoil.

Keywords: Ethiopia, resources, water supply, surface water, groundwater, hydrosphere, natural conditions, structural and tectonic features

For citation: Yoshe A.K., Auzina L.I. Analysis of natural water resources formation and distribution conditions in Central Ethiopia. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):65-76. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-65-76>. EDN: VQFHHZ.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 556.33+556.5

Анализ условий формирования и распределения ресурсов природных вод на территории Центральной Эфиопии

А.К. Йоше^a, Л.И. Аузина^b✉

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

^aУниверситет Арба Минч, Арба Минч, Эфиопия

Резюме. Вода – важнейший природный ресурс, обеспечивающий функционирование экологической системы Земли. Изменчивость ресурсного потенциала гидросфера оказывает существенное, если не определяющее, влияние на социально-экономическое развитие мира, включая Эфиопию, особенно ее центральные районы, где основным источником водоснабжения являются поверхностные воды. Растущие урбанизация, индустриализация и развитие сельского хозяйства привели к увеличению спроса на разноцелевое водоснабжение в аграрном секторе, промышленности и энергетике. Из-за возросшего спроса на воду в засушливые сезоны года в стране ощущается острая ее нехватка, в то же время в сезоны дождей количество поверхностных вод вполне удовлетворяет современные

потребности. Цель данного исследования – анализ природных условий формирования и распределения ресурсного потенциала поверхностных и подземных вод Центральной Эфиопии, выявление участков, наиболее перспективных для поисково-разведочных работ на подземные воды. В результате обработки и анализа материалов, которые осуществлялись с использованием облачных технологий Google Earth Engine и ряда программных комплексов, определено, что решающее значение в формировании природных условий как Эфиопии в целом, так и ее центральной части в распределении ресурсов природных вод играет структурно-тектоническое развитие территории, обусловленное приуроченностью региона к Восточно-Африканской рифтовой зоне. Рельеф, климатические особенности, основные геоморфологические и геологические структуры – результат прошедших и продолжающихся тектонических процессов. Понимание условий формирования и распределения поверхностных и подземных вод региона, значительный объем исходного материала, использование современных средств его обработки являются базой для количественной оценки ресурсов поверхностных вод и оконтуривания наиболее водообильных участков недр.

Ключевые слова: Эфиопия, ресурсы, водоснабжение, поверхностные воды, подземные воды, гидросфера, природные условия, структурно-тектонические особенности

Для цитирования: Йоше А.К., Аузина Л.И. Анализ условий формирования и распределения ресурсов природных вод на территории Центральной Эфиопии // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 65–76. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-65-76>. EDN: VQFHHZ.

Introduction

Water is a limited natural resource [1–4]. The variability of this resource has largely determine the functioning of the Earth's ecological system and the development of the social and economic structures of the world, including Ethiopia, especially its central regions. The intensity of urbanization [5] and a sharp increase in the world's population [6], the deterioration of the environmental situation, significant water losses in industry and utilities [7], as well as the irrational use of natural water, led to a noticeable reduction in water resources [8].

Due to the growing demand for water in Ethiopia, there is an acute shortage of water during the dry periods of the year, while excess surface water occurs during the rainy season, which fully meets existing needs. Pollution also exacerbates a region's water scarcity by making water unfit for different uses and reducing freshwater availability and local water scarcity may lead to economic output losses, and the risk can be transmitted to downstream sectors through reduced input supplies [9–11].

Global climate change affects the intensity of precipitation [12], infiltration [13] and evapotranspiration [14, 15]. These changes affect the rivers water abundance and the recharge of aquifers [16–18], which are used for water supply and determine the availability of water resources [16, 19, 20]. The uneven distribution of water within the country plays a major role, which further increases the economic consequences of water scarcity. Thus, assessing the spatial structure of water scarcity is very important for reducing economic risks in various economic sectors.

These reasons necessitate a detailed analysis of the natural conditions for the formation

and long-term monitoring of the water resources in Central Ethiopia, which is necessary for decision-making regarding the management of water resource potential and the development of a structure for its use for sustainable economic development of the region.

This study aims to reveal the natural conditions for the formation and distribution of surface and groundwater resource potential in Central parts of Ethiopia and to identify areas most promising for prospecting and exploration of groundwater for multipurpose water supply.

To achieve this goal, the following tasks are investigate:

- analysis of surface and groundwater natural conditions for the formation in Central Ethiopia;
- characteristics of spatial and temporal variability of the hydrodynamic regime of the surface and groundwater resource potential in Central Ethiopia;
- identification of the main factors influencing the spatial and temporal dynamics of the natural water water resource potential.

Materials and methods

The study area is located in the central part of Ethiopia in the zone of influence of one of the largest spreading structures – the East African Rift System.

The analysis for the conditions of distribution and formation of natural water resources is based on a large volume of heterogeneous datasets, including long-term precipitation and temperature data obtained at the Ethiopian Meteorological Institute; geological and structural-tectonic maps provided by the Ministry of Mines and Petroleum of Ethiopia; information on groundwater intake wells obtained from the Ministry of Energy and



Ethiopia's water resources, etc. In addition, remote sensing data was used in this study, including digital terrain models, lineament density, and other materials. The total volume of the database was 1,500 observation well points, characterized by 34 indicators. The materials were analyzed using Google Earth Engine cloud technologies and a number of software packages, including PCI Geomatica, R-Studio, and ArcGIS 10.4.

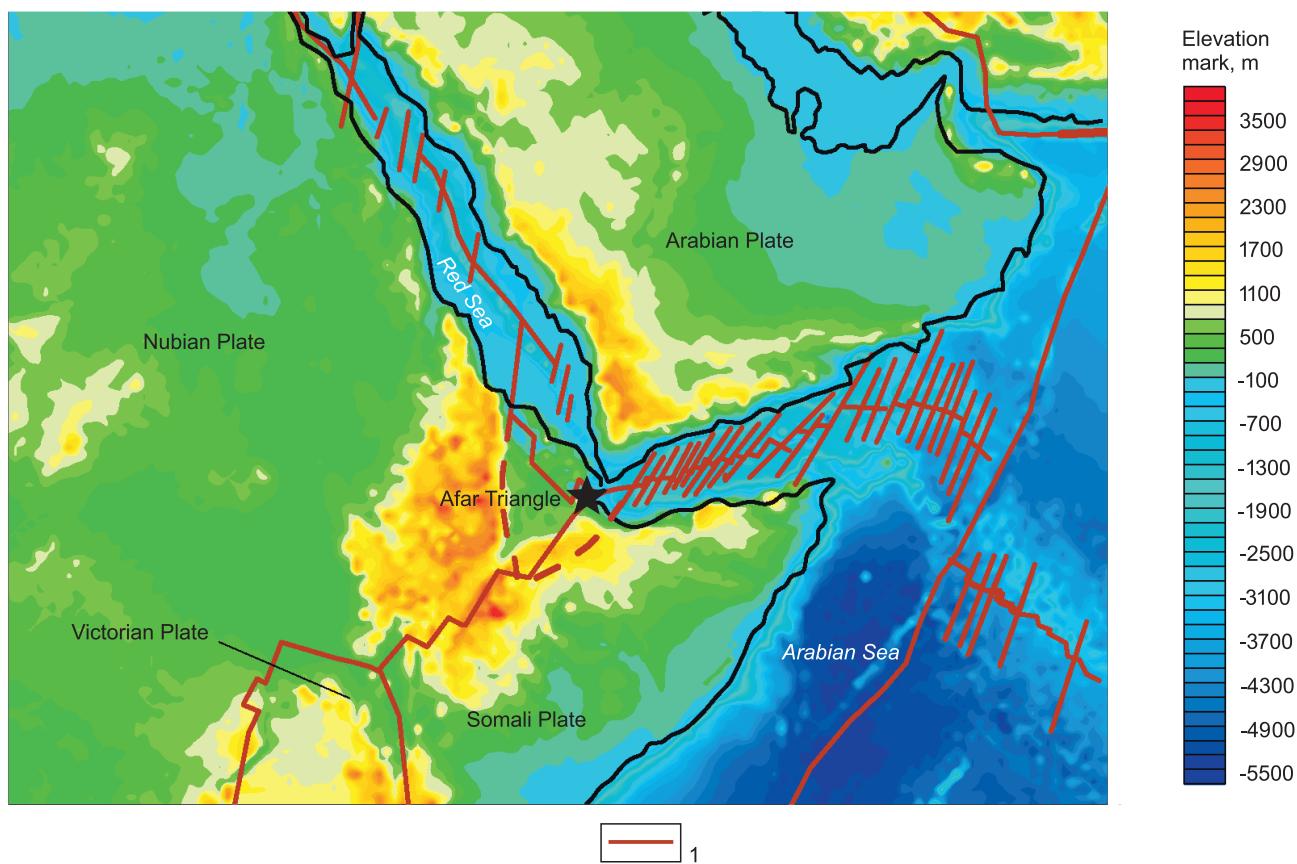
Results and discussion

The most significant influence on the formation of Ethiopia's natural conditions, including water resources, as in other similar regions [21, 22], was exerted by the structural and tectonic development of the territory, due to its proximity to the East African Rift zone. Ethiopia is located at the junction of three lithospheric plates: Nubian, Arabian and Somali (Fig. 1). As a result of the developing rifting process, a number of elongated low-lying valleys were formed, bounded by steeply falling normal faults and separated by raised blocks. The Nubian and Somali plates separate

from the Arabian Plate in the north, thus creating a Y-shaped rifting system. These plates intersect in the Afar region of Ethiopia in an area known as the "triple junction", where the formation of an active continental rift zone begins, extending further south and began developing in the Miocene [23].

The main factors influencing the formation of surface and groundwater resources were identified: relief, density of the river network and steepness of the slopes, climatic characteristics (precipitation, temperature, evapotranspiration, etc.), structural-tectonic and geological-hydrogeological features of the territory.

The topography of Ethiopia is one of the most rugged and complex in Africa and is divided into five topographic units: the Main Rift Valley, the Western Lowland, the Western Highlands, the Eastern Lowlands and the Eastern Highlands. In general, the position of the territory of Ethiopia above sea level ranges from -48 m (at the sides of volcanic structures in the Denakil depression, the mark of the bottom of the volcano of the same name is -214 m) to 4620 m (Ras Dashen Mountain). In the central



*Fig. 1. Overview map of main tectonic element location in the region (a fragment)
(according to the source [23] with authors' translation):*

1 – faults

*Рис. 1. Обзорная карта расположения основных тектонических элементов региона (фрагмент)
(согласно источнику [23] с переводом авторов):*
1 – разломы



part, the absolute elevation ranges from 74 m (Afar Valley) to 4266 m (Choki Mountain) (Fig. 2).

The sharply dissected relief plays a significant role in the formation of water resources, since at high altitudes there is an accelerated flow of water from the upper to the lower sections of the slope, which increases the surface runoff in accordance with the hydraulic slope, on more gentle slopes the volume of surface runoff decreases, which allows more precipitation to penetrate into the earth's crust through zones of exogenous and tectonic fracturing [24]. In addition, the steepness of the slopes significantly affects the infiltration rate and distribution of water among various geomorphological elements [25, 26]. For example, studies conducted in Taiwan prove that there is a significant correlation between changes in absolute altitudes and groundwater levels [26, 27]. Thus, taking into account topographic features when considering the conditions for the formation of natural water resources is necessary and fully justified.

The variation of Ethiopia's terrain leads to dramatic differences in climatic conditions. The country's territory is located in the equatorial and sub-equatorial zones. The location of the central part of the country within the Ethiopian Highlands explains the milder and wetter climate in this region. The lowland eastern regions of Ethiopia are the complete opposite: they have a hot and dry desert climate.

The amount of precipitation in the region also fluctuates widely: from 620 to 1200 mm/year. The annual precipitation layer thickness fluctuates from 9.10 to 162.5 mm (Fig. 3). Such significant areal fluctuations are characteristic of the development of the intertropical convergence zone [28]. The maximum amount of precipitation falls in the southern and southwestern parts of the country, where equatorial tropical forests are widespread, and the minimum – in the eastern, northeastern and southeastern parts of Ethiopia (for example, the Ogaden region, the Danakil Desert, etc.).

Seasonal variations in precipitation are an important factor in assessing natural water resources. In Ethiopia, there are three main seasons: the dry Bega season (October to January), the less dry Belg season (February to May), and the rainy Kiremt season (June to September) [29].

Evaporation plays a significant role in the distribution of water resources, especially in natural water bodies such as lakes, rivers, and reservoirs. The amount of evaporation decreases from the southwest to the northeast of Ethiopia from 1600–1800 mm/year to 600–1000 mm/year. Accordingly, the evapotranspiration index changes, taking into account the total amount of moisture entering the atmosphere in the form of steam as a result of transpiration and evaporation from the soil and from the surface of vegetation (Fig. 4). The total evapotrans-

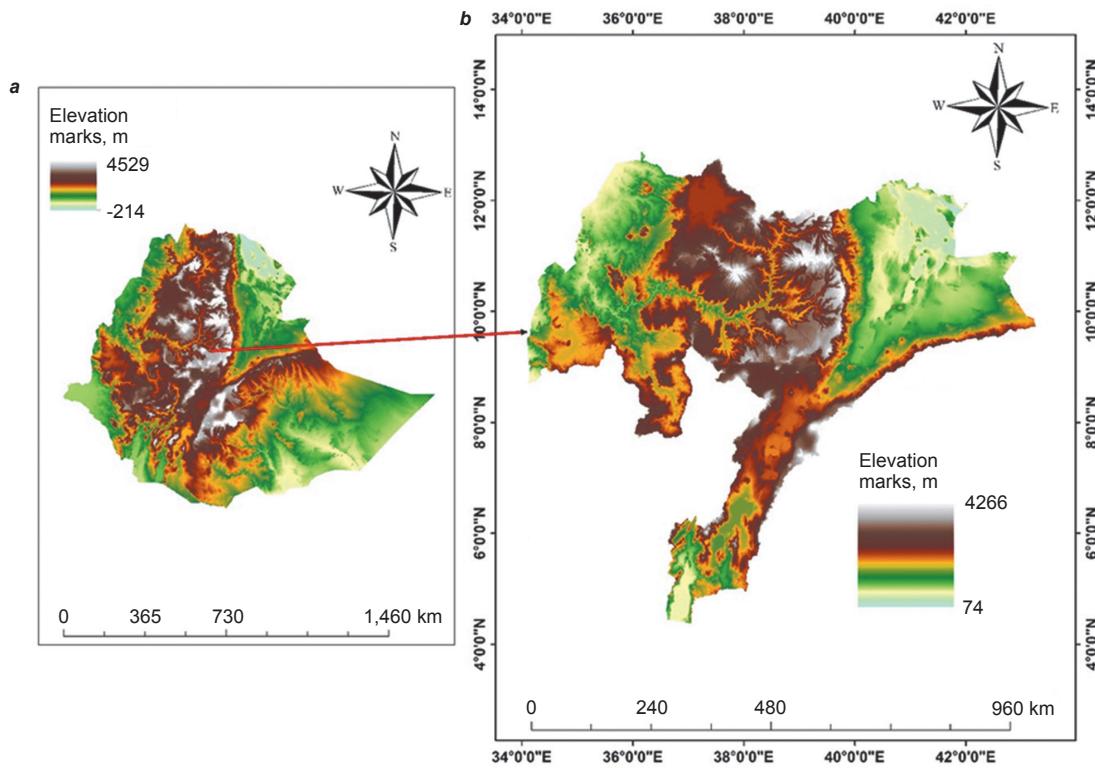


Fig. 2. Digital elevation model of Ethiopia (a) and its central part (b)
Рис. 2. Цифровая модель рельефа Эфиопии (а) и ее центральной части (б)

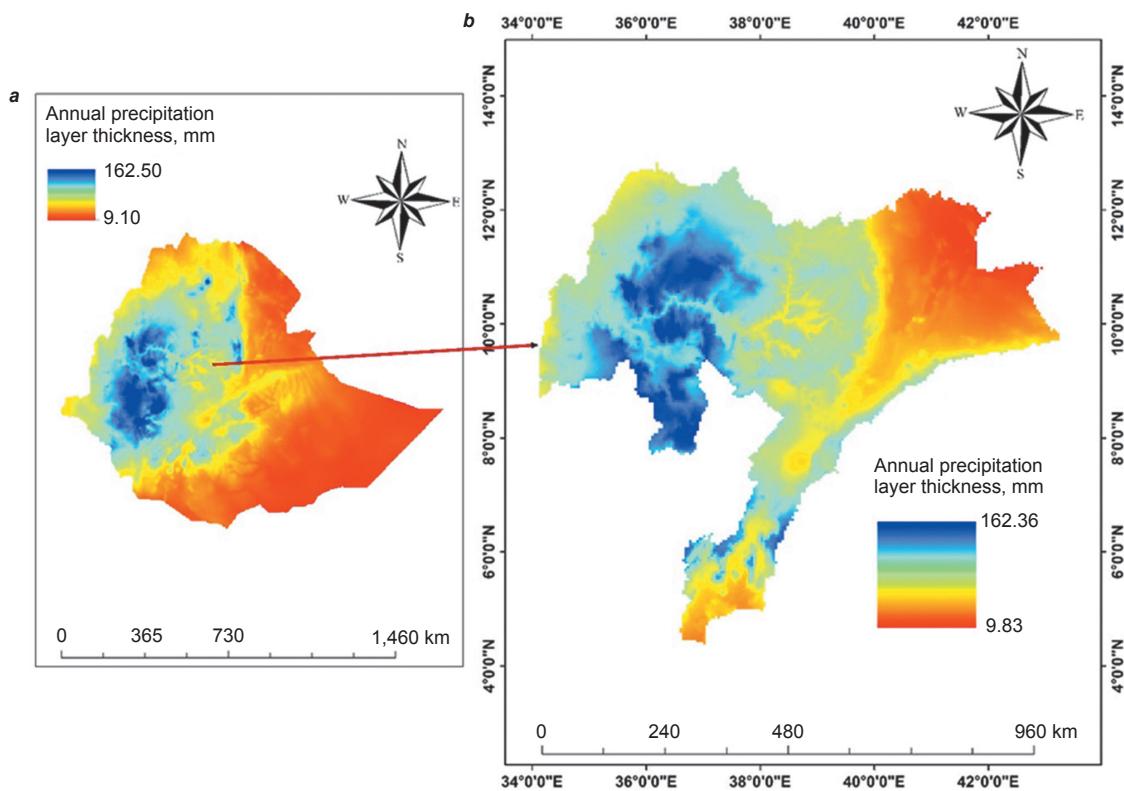


Fig. 3. Distribution of annual precipitation layer thickness on the territory of Ethiopia (a) and in its central part (b)

Рис. 3. Распределение мощности слоя атмосферных осадков на территории Эфиопии (а) и ее центральной части (б)

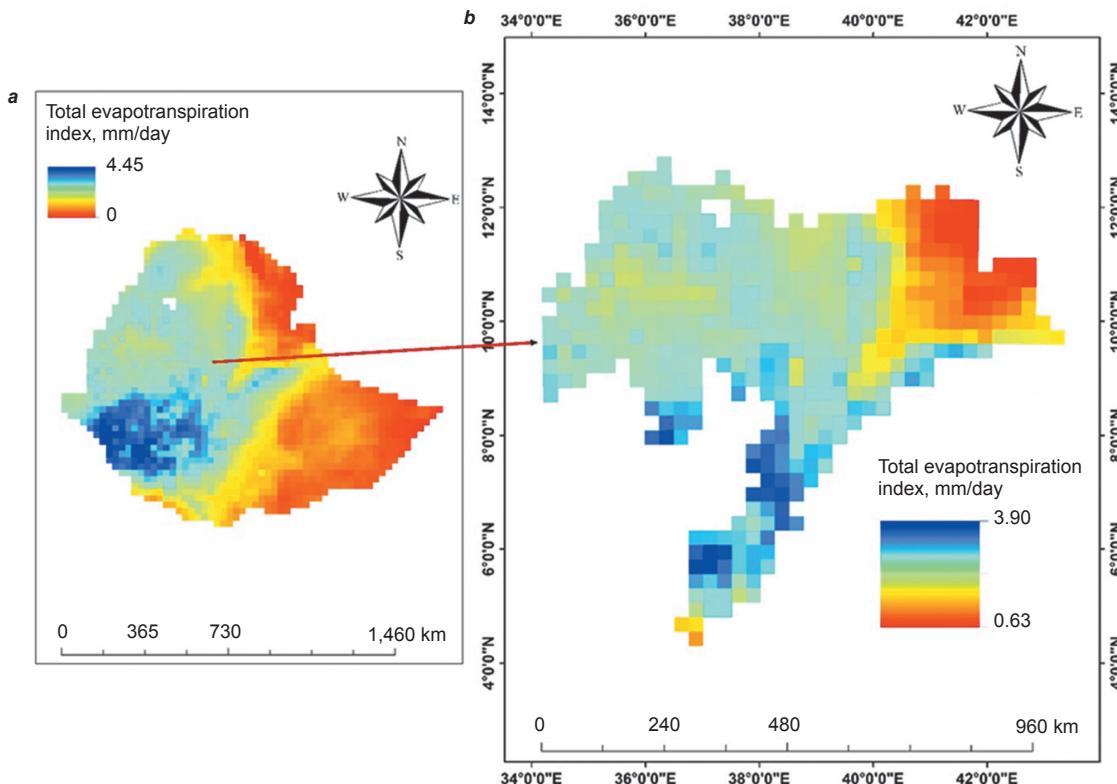


Fig. 4. Distribution of total evapotranspiration on the territory of Ethiopia (a) and in its central part (b)

Рис. 4. Распределение суммарного показателя эвапотранспирации на территории Эфиопии (а) и ее центральной части (б)



piration index depends on the landscape features of the study area, most of which is occupied by agricultural lands and steppes (Fig. 5).

The temperature regime is also one of the most important factors influencing the formation of water resources, since it regulates the evaporation rate and humidity of air and soil. This is especially noticeable in arid and semi-arid regions [30]. The temperature in Ethiopia ranges from 6.6 to 31.5 °C (Fig. 6). May is a hot and dry month preceding the long rainy season in June, July and August. The lowest temperatures are usually observed in December or January, and the hottest in March, April or May. Average annual temperatures in highlands are about 15–20 °C, while in the lowlands it is 25–30 °C. The average annual temperature in Ethiopia from 1901 to 2024 ranged from 22.15 to 23.96 °C. An increase in temperature leads to significant changes in the amount and intensity of precipitation, as well as an increase in water temperature.

Surface water resources used for multi-purpose water supply during periods of precipitation are determined by an extensive river network. Most of the rivers in western Ethiopia belong to the Nile basin. The largest among them is Abbaye or Blue Nile. Ethiopia's largest lake, Lake Tana, is located here in the north of the country, which is the source of the Blue Nile. In the east, the rivers are less full, which is associated with a more arid climate. The largest river is the Juba. A large number of small lakes are located in the Great Rift Valley area. The level of reliability of determining the boundaries of catchment areas plays an essential role in assessing surface water resources [31]. In conditions of very low study of the country's territory, remote sensing data was used to determine the boundaries of river basins, followed by the use of GIS technologies, which made it possible to identify 9 river basins within Ethiopia (Fig. 7): Abbay, Genale, Ogaden,

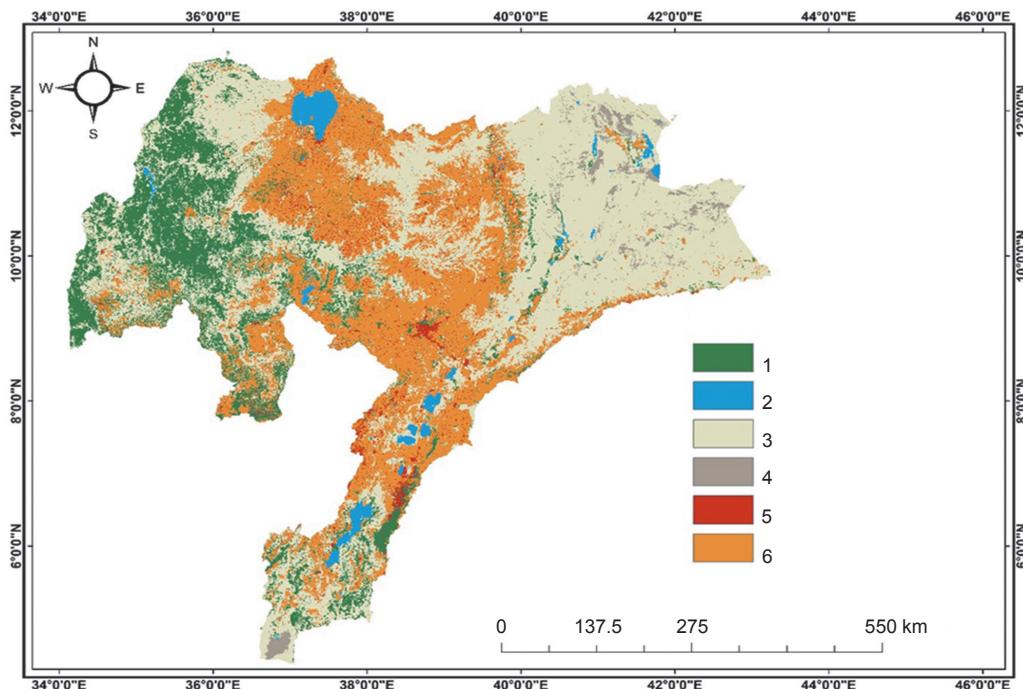


Fig. 5. Natural and man-made landscapes of the central part of Ethiopia (in accordance with GOST 17.8.02-88¹):

- 1–4 – natural landscapes: 1 – forest, 2 – water (lakes, rivers, flooded areas), 3 – steppe,
- 4 – deserts, semi-deserts, volcanic structures;
- 5, 6 – man-made landscapes:
- 5 – industrial and settlement landscapes, 6 – agricultural landscapes

Рис. 5. Природно-техногенные ландшафты центральной части Эфиопии (в соответствии с ГОСТ 17.8.02-88¹):

- 1–4 – природные ландшафты: 1 – лесные, 2 – водные (озера, реки, плавни), 3 – степи,
- 4 – пустыни, полупустыни, вулканические сооружения;
- 5, 6 – искусственные ландшафты:
- 5 – промышленные и поселения, 6 – сельскохозяйственные

¹ GOST 17.8.02-88. The interstate standard. Nature conservation. Landscapes. Classification. Meganorm.ru. Available from: <https://meganorm.ru/Data/196/19614.pdf> [Accessed 12th December 2024]. (In Russ.).

ГОСТ 17.8.1.02-88. Охрана природы. Ландшафты. Классификация // Meganorm.ru. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data/196/19614.pdf> (дата обращения: 12.12.2024).

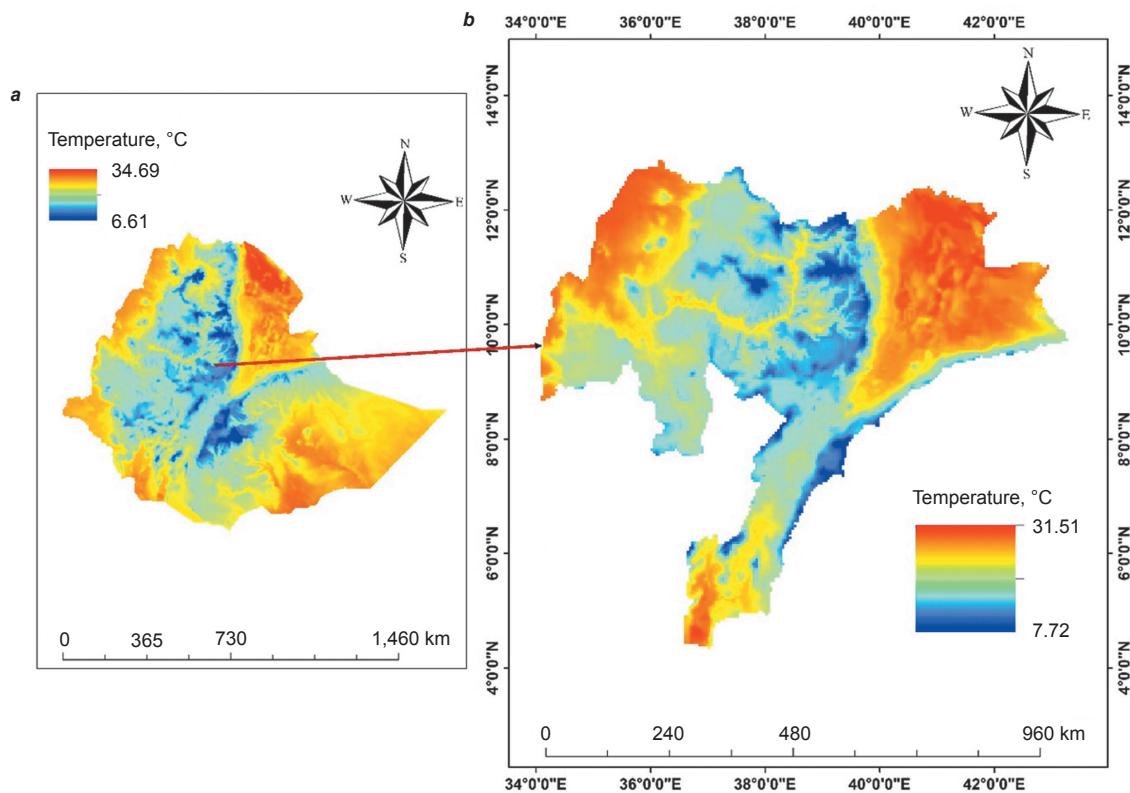


Fig. 6. Temperature distribution on the territory of Ethiopia in general (a) and in its central part (b)
Рис. 6. Распределение температуры на территории Эфиопии (а) и ее центральной части (б)

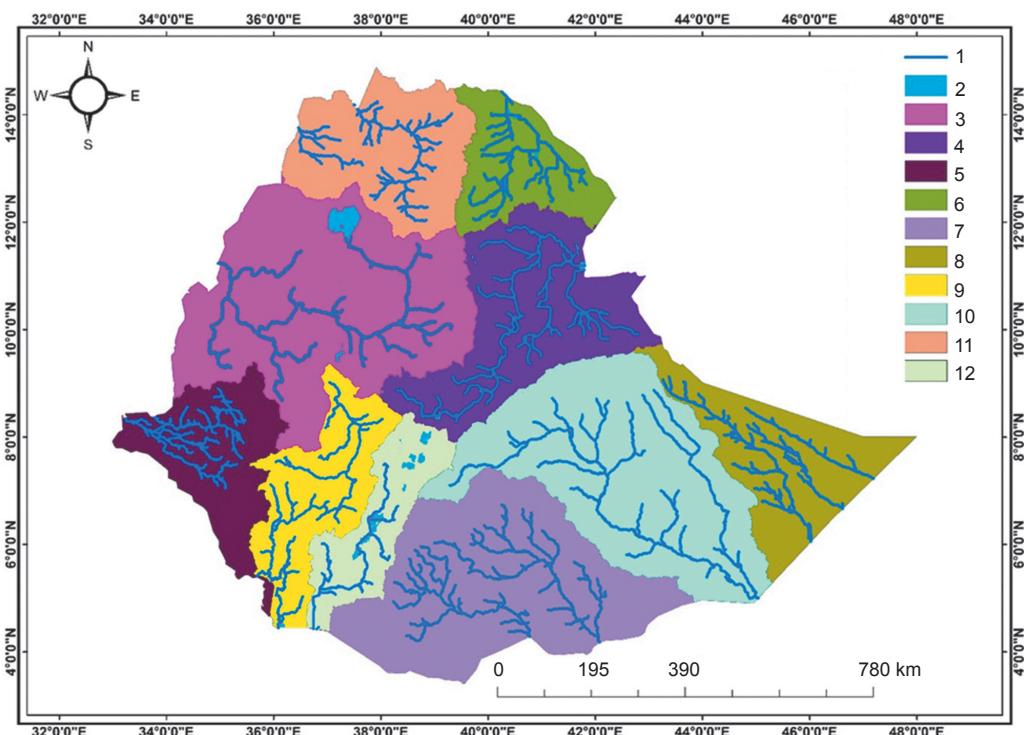


Fig. 7. River basins identified on the territory of Ethiopia:
1 – rivers; 2 – lakes; 3 – the Abbay Basin; 4 – the Awash Basin; 5 – the Baro-Akobo Basin;
6 – the Denakil DepBasin; 7 – the Genale Basin; 8 – the Ogaden Basin; 9 – the Omo Gibe Basin;
10 – the Wabshe Basin; 11 – the Tekeze Basin; 12 – Rift Valley Drainage Basin

Рис. 7. Речные бассейны, выделенные на территории Эфиопии:
1 – реки; 2 – озера; 3 – бассейн р. Аббай; 4 – бассейн р. Аваш; 5 – бассейн р. Баро Акоб;
6 – бассейн р. Денакиль; 7 – бассейн р. Генале; 8 – бассейн р. Огаден; 9 – бассейн р. Омо Гибе;
10 – бассейн р. Вабше; 11 – бассейн р. Текезе; 12 – водосборный бассейн рифтовой долины

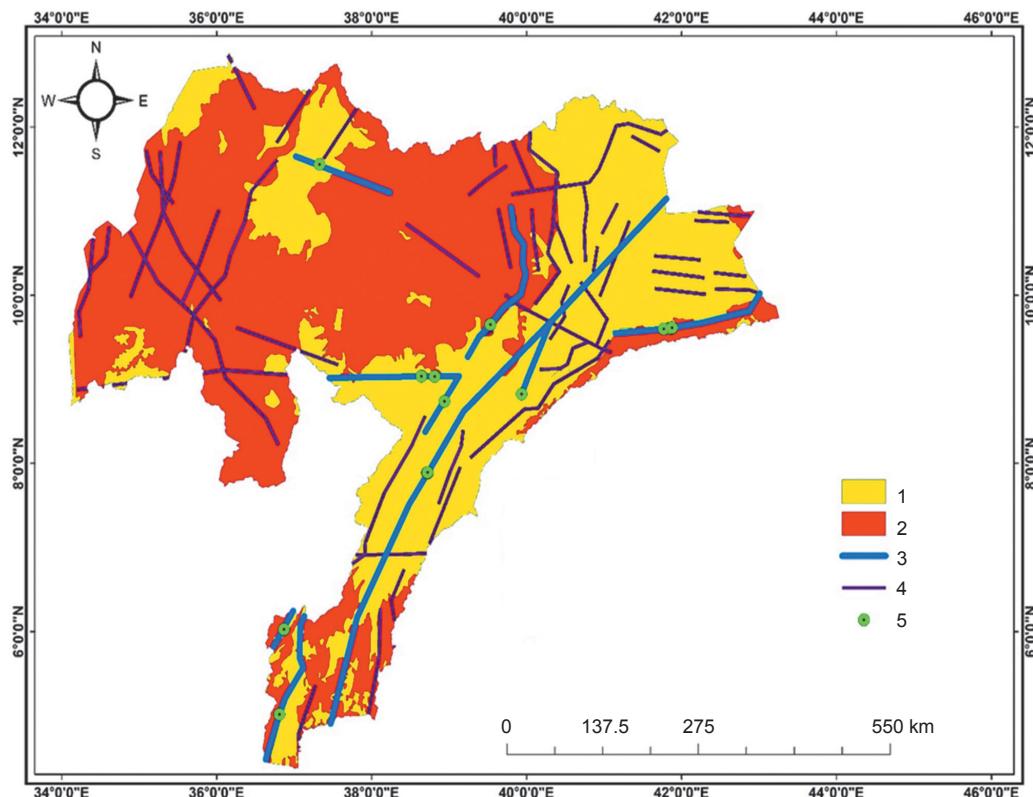


Fig. 8. Structural and hydrogeological diagram of Central Ethiopia:
 1 – hydrogeological basins; 2 – hydrogeological massifs; 3 – (inferred) flooded faults;
 4 – faults unexplored hydrogeologically; 5 – hydrogeological wells

Рис. 8. Структурно-гидрогеологическая схема Центральной Эфиопии:
 1 – гидрогеологические бассейны; 2 – гидрогеологические массивы;
 3 – предположительно обводненные разломы; 4 – разломы, гидрогеологическая роль
 которых не определена; 5 – гидрогеологические скважины

Wabishebele, Tekese, Awash, Danakil, Baro-Akobo, Omo-Gibe, and There is also a basin that unites surface waters confined to the southern part of the Rift Valley. Catchment areas range from 58,000 km² (Danakil River) to 207,000 km² (Abbay River).

As a result of tectonic development and geological and structural features of the territory of Ethiopia, the structural – hydrogeological conditions of the region have formed, which play a crucial role in the distribution of groundwater storage. Within Central Ethiopia, hydrogeological basins have been identified, confined to low relief areas and river valleys and composed mainly of loose quaternary sediments; hydrogeological massifs occupying mountainous areas and volcanic structures, represented by limestones, dolomites, intrusive and effusive formations²; flooded faults, formed mainly within the areas of carbonate sediment development (Fig. 8).

Conclusions

Thus, the structural and tectonic development of the territory, due to its confinement to the East African Rift Zone, played a decisive role in the formation of natural water resources in Ethiopia as a whole, and its Central part, in particular. The relief, climatic features, main geomorphological and geological structures are the result of past and neotectonic processes. Understanding the conditions of formation and distribution of surface and groundwater in the region, a significant volume of initial data, the use of modern means of its processing will allow us to quantitatively assess surface water resources and outline the most promising subsoil areas for exploration work on groundwater necessary to meet the economic and drinking needs of Central Ethiopia, especially during dry periods of the year. In the future, it is planned to develop the complex index of water abundance based on the results of assessing the geographical, geological-tectonic, structural-hydrogeological features of the study area.

² Alemu T. General geology (geol 2081). Chapter 7: Geology of Ethiopia. Addis Ababa; 2012, 11 p.



References

1. Hsu Y.J., Fu Y., Bürgmann R., Hsu S.Y., Lin C.C., Tang C.H., et al. Assessing seasonal and interannual water storage variations in Taiwan using geodetic and hydrological data. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020;550:116532. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116532>.
2. Du C., Sun F., Yu J., Liu X., Chen Y. New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016;20(1):393-409. <https://doi.org/10.5194/hess-20-393-2016>.
3. Bouaziz L.J.E., Steele-Dunne S.C., Schellekens J., Weerts A.H., Stam J., Sprokkereef E., et al. Improved understanding of the link between catchment-scale vegetation accessible storage and satellite-derived soil water index. *Water Resources Research*. 2020;56(3):e2019WR026365. <https://doi.org/10.1029/2019WR026365>.
4. Yoshe A.K. Water availability identification from GRACE dataset and GLDAS hydrological model over data-scarce river basins of Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*. 2024;69(6):721-745. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2333852>.
5. Goldblatt R., You W., Hanson G., Khandelwal A.K. Detecting the boundaries of urban areas in India: a dataset for pixel-based image classification in Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2016;8(8):634. <https://doi.org/10.3390/rs8080634>.
6. Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*. 2016;2(2):e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.
7. Auzina L.I. Forecasting groundwater rise in the historic downtown area of Irkutsk city. *Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):172-183. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-172-183>. EDN: POJFKV.
8. Salman M.A. United nations general assembly resolution: international decade for action, water for life, 2005–2015. *Water International*. 2005;30(3):415-418. <https://doi.org/10.1080/02508060508691884>.
9. Li J., Yang J., Liu M., Ma Z., Fang W., Bi J. Quality matters: pollution exacerbates water scarcity and sectoral output risks in China. *Water Research*. 2022;224:119059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119059>.
10. Wang M., Bodirsky B.L., Rijneveld R., Beier F., Bak M.P., Batool M., et al. A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communication*. 2024;15(1):880. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>.
11. Uddin M.G., Nash S., Olbert A.I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*. 2021;122:107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
12. Fu Y., Wu Q. Recent emerging shifts in precipitation intensity and frequency in the global tropics observed by satellite precipitation data sets. *Geophysical Research Letters*. 2024;51(15):e2023GL107916. <https://doi.org/10.1029/2023GL107916>.
13. Dao P.U., Heuzard A.G., Le T.X.H., Zhao J., Yin R., Shang C., et al. The impacts of climate change on groundwater quality: a review. *Science of the Total Environment*. 2024;912:169241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>.
14. Bartczak A., Krzeminski M., Aražny A. Changes in evaporation patterns and their impact on Climatic Water Balance and river discharges in central Poland, 1961–2020. *Regional Environmental Change*. 2024;24(130). <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02296-3>.
15. Wang M., Zhang Y., Lu Y., Gong X., Gao L. Detection and attribution of reference evapotranspiration change (1951–2020) in the Upper Yangtze River Basin of China. *Journal of Water and Climate Change*. 2021;12(6):2624-2638. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.011>.
16. Vörösmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 2000;289(5477):284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>.
17. Punia A., Singh S.K., Bharti R. Chapter 3 – Effect of climate change on urban water availability and its remediation in different continents. In: Srivastav A.L., Madhav S., Bhardwaj A.K., Valsami-Jones E. (eds). *Current directions in water scarcity research. Vol. 6: Urban water crisis and management. Strategies for sustainable development*. Elsevier; 2022, p. 45-63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91838-1.00002-6>.
18. Marsz A.A., Sobkowiak L., Styszyńska A., Wrzesiński D. Causes and course of climate change and its hydrological consequences in the Greater Poland region in 1951–2020. *Quaestiones Geographicae*. 2022;41(3):183-206. <https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0033>.
19. Wubneh M.A., Worku T.A., Chekol B.Z. Climate change impact on water resources availability in the Kiltie watershed, Lake Tana sub-basin, Ethiopia. *Heliyon*. 2023;9(3):e13941. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13941>.
20. Gbohoui Y.P., Paturel J.E., Tazen F., Mounirou L.A., Yonaba R., Karambiri H., et al. Impacts of climate and environmental changes on water resources: a multi-scale study based on Nakanbé nested watersheds in West African Sahel. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021;35:100828. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100828>.
21. Lobatskaya R.M., Auzina L.I., Zhang Y., Vanteeva M.A., Saprykina M.I., Semilet A.A., et al. Comparative analysis of Cenozoic volcanism in the East China block and Tunkinsky rift zone of the Baikal rift system. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):121-131. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-121-131>. EDN: GDUDFM.
22. Surmaajav D. Features of the thermal water phenomena in the Khangai arch uplift (Mongolia). *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):529-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-529-538>. EDN: RUHRSY.
23. Eppelbaum L.V., Ben-Avraham C., Katz Y.I., Cloting S., Kaban M.K. Giant quasi-ring mantle structure in the African-Arabian junction zone: data from a complex of geological and geophysical researches. *Geotektonika*. 2021;1:662-693. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016853X21010057>. EDN: SGREGEM.
24. Avand M., Janizadeh S., Bui D.T., Pham V.H., Ngo P.T.T., Nhu V.H. A tree-based intelligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater. *International Journal of Digital Earth*. 2020;13(12):1408-1429. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1718785>.



25. Chen C., Zou X., Singh A.K., Zhu X., Zhang W., Yang B., et al. Effects of hillslope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China. *Journal of Environmental Management*. 2021;299:113672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113672>.
26. Yoshe A.K. Integrated approach for groundwater potential exploration in Abbay River Basin, East Africa. *Sustainable Water Resources Management*. 2024;10(93). <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01026-7>.
27. Chen C.-H., Wang C.-H., Hsu Ya-J., Yu S.-B., Kuo L.-Ch. Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. *Engineering Geology*. 2010;115(1-2):122-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011>.
28. Wang H., Gao J.E., Zhang M., Li X., Zhang S., Jia L.Z. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. *Catena*. 2015;127:80-91. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.014>.
29. Seleshi Y., Zanke U. Recent changes in rainfall and rainy days in Ethiopia. *International Journal of Climatology*. 2004; 24(8):973-983. <https://doi.org/10.1002/joc.1052>.
30. Wu W.-Y., Lo M.-H., Wada Y., Famiglietti J.S., Reager J.T., Yeh P.J.-F., et al. Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*. 2020;11(1):3710. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17581-y>.
31. Shaikh A.A., Pathan A.I., Waikhom S.I., Rathod P. Comparison of watershed delineation and drainage network using ASTER and CARTOSAT DEM of Surat City, Gujarat. In: *Intelligent Computing & Optimization. ICO 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham: Springer; 2022, vol. 371, p. 788-800. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93247-3_75.

Список источников

1. Hsu Y.J., Fu Y., Bürgmann R., Hsu S.Y., Lin C.C., Tang C.H., et al. Assessing seasonal and interannual water storage variations in Taiwan using geodetic and hydrological data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 550. P. 116532. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116532>.
2. Du C., Sun F., Yu J., Liu X., Chen Y. New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016. Vol. 20. Iss. 1. P. 393–409. <https://doi.org/10.5194/hess-20-393-2016>.
3. Bouaziz L.J.E., Steele-Dunne S.C., Schellekens J., Weerts A.H., Stam J., Sprokkereef E., et al. Improved understanding of the link between catchment-scale vegetation accessible storage and satellite-derived soil water index // *Water Resources Research*. 2020. Vol. 56. Iss. 3. P. e2019WR026365. <https://doi.org/10.1029/2019WR026365>.
4. Yoshe A.K. Water availability identification from GRACE dataset and GLDAS hydrological model over data-scarce river basins of Ethiopia // *Hydrological Sciences Journal*. 2024. Vol. 69. Iss. 6. P. 721–745. <https://doi.org/10.1080/0262667.2024.2333852>.
5. Goldblatt R., You W., Hanson G., Khandelwal A.K. Detecting the boundaries of urban areas in India: a dataset for pixel-based image classification in Google Earth Engine // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. Iss. 8. P. 634. <https://doi.org/10.3390/rs8080634>.
6. Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Four billion people facing severe water scarcity // *Science Advances*. 2016. Vol. 2. Iss. 2. P. e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.
7. Auzina L.I. Forecasting groundwater rise in the historic downtown area of Irkutsk city // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 172–183. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-172-183>. EDN: POJFKV.
8. Salman M.A. United nations general assembly resolution: international decade for action, water for life, 2005–2015 // *Water International*. 2005. Vol. 30. Iss. 3. P. 415–418. <https://doi.org/10.1080/02508060508691884>.
9. Li J., Yang J., Liu M., Ma Z., Fang W., Bi J. Quality matters: pollution exacerbates water scarcity and sectoral output risks in China // *Water Research*. 2022. Vol. 224. P. 119059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119059>.
10. Wang M., Bodirsky B.L., Rijneveld R., Beier F., Bak M.P., Batool M., et al. A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution // *Nature Communication*. 2024. Vol. 15. Iss. 1. P. 880. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>.
11. Uddin M.G., Nash S., Olbert A.I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 122. P. 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
12. Fu Y., Wu Q. Recent emerging shifts in precipitation intensity and frequency in the global tropics observed by satellite precipitation data sets // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51. Iss. 15. P. e2023GL107916. <https://doi.org/10.1029/2023GL107916>.
13. Dao P.U., Heuzard A.G., Le T.X.H., Zhao J., Yin R., Shang C., et al. The impacts of climate change on groundwater quality: a review // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 912. P. 169241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>.
14. Bartczak A., Krzemiński M., Araźny A. Changes in evaporation patterns and their impact on Climatic Water Balance and river discharges in central Poland, 1961–2020 // *Regional Environmental Change*. 2024. Vol. 24. Iss. 130. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02296-3>.
15. Wang M., Zhang Y., Lu Y., Gong X., Gao L. Detection and attribution of reference evapotranspiration change (1951–2020) in the Upper Yangtze River Basin of China // *Journal of Water and Climate Change*. 2021. Vol. 12. Iss. 6. P. 2624–2638. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.011>.



16. Vörösmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth // *Science*. 2000. Vol. 289. Iss. 5477. P. 284–288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>.
17. Punia A., Singh S.K., Bharti R. Chapter 3 – Effect of climate change on urban water availability and its remediation in different continents // *Current directions in water scarcity research*. Vol. 6: Urban water crisis and management. Strategies for sustainable development / eds A.L. Srivastav, S. Madhav, A.K. Bhardwaj, E. Valsami-Jones. Elsevier, 2022. P. 45–63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91838-1.00002-6>.
18. Marsz A.A., Sobkowiak L., Styszyńska A., Wrzesiński D. Causes and course of climate change and its hydrological consequences in the Greater Poland region in 1951–2020 // *Quaestiones Geographicae*. 2022. Vol. 41. Iss. 3. P. 183–206. <https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0033>.
19. Wubneh M.A., Worku T.A., Chekol B.Z. Climate change impact on water resources availability in the kiltie watershed, Lake Tana sub-basin, Ethiopia // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Iss. 3. P. e13941. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13941>.
20. Gbohoui Y.P., Paturel J.E., Tazen F., Mounirou L.A., Yonaba R., Karambiri H., et al. Impacts of climate and environmental changes on water resources: a multi-scale study based on Nakambé nested watersheds in West African Sahel // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021. Vol. 35. P. 100828. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100828>.
21. Лобацкая Р.М., Аузина Л.И., Чжан Ю., Вантеева М.А., Сапрыкина М.И., Семилет А.А. [и др.]. Сравнительный анализ кайнозойского вулканизма Восточно-Китайского блока и Тункинской рифтовой зоны Байкальской рифтовой системы // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 1. С. 121–131. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-121-131>. EDN: GDUDFM.
22. Сурмаажав Д. Особенности проявлений термальных вод Хангайского сводового поднятия (Монголия) // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 529–538. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-529-538>. EDN: RUHRSY.
23. Эппельбаум Л.В., Бен-Аврахам Ц., Кац Ю.И., Клотинг С., Кабан М.К. Гигантская квази-кольцевая мантийная структура в зоне Африкано-Аравийского сочленения: данные комплекса геологических и геофизических исследований // *Геотектоника*. 2021. № 1. С. 662–693. <https://doi.org/10.31857/S0016853X21010057>. EDN: SGRGEM.
24. Avand M., Janizadeh S., Bui D.T., Pham V.H., Ngo P.T.T., Nhu V.H. A tree-based intel-ligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater // *International Journal of Digital Earth*. 2020. Vol. 13. Iss. 12. P. 1408–1429. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1718785>.
25. Chen C., Zou X., Singh A.K., Zhu X., Zhang W., Yang B., et al. Effects of hillslope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 299. P. 113672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113672>.
26. Yoshe A.K. Integrated approach for groundwater potential exploration in Abbay River Basin, East Africa // *Sustainable Water Resources Management*. 2024. Vol. 10. Iss. 93. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01026-7>.
27. Chen C.-H., Wang C.-H., Hsu Ya-J., Yu S.-B., Kuo L.-Ch. Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan // *Engineering Geology*. 2010. Vol. 115. Iss. 1–2. P. 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011>.
28. Wang H., Gao J.E., Zhang M., Li X., Zhang S., Jia L.Z. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model // *Catena*. 2015. Vol. 127. P. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.014>.
29. Seleshi Y., Zanke U. Recent changes in rainfall and rainy days in Ethiopia // *International Journal of Climatology*. 2004. Vol. 24. Iss. 8. P. 973–983. <https://doi.org/10.1002/joc.1052>.
30. Wu W.-Y., Lo M.-H., Wada Y., Famiglietti J.S., Reager J.T., Yeh P.J.-F., et al. Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 3710. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17581-y>.
31. Shaikh A.A., Pathan A.I., Waikhom S.I., Rathod P. Comparison of watershed delineation and drainage network using ASTER and CARTOSAT DEM of Surat City, Gujarat // *Intelligent Computing & Optimization*. ICO 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer, 2022. Vol. 371. P. 788–800. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93247-3_75.

Information about the authors / Информация об авторах



Agegnehu K. Yoshe,
Postgraduate Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Lecturer of the Department of Water Resources and Irrigation Engineering,
Arba Minch University,
Arba Minch, Ethiopia,
kitanbo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3792-5854>



Йоше Агегнеху Китанбо,
аспирант,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
преподаватель кафедры охраны окружающей среды,
Университет Арба Минч,
г. Арба Минч, Эфиопия,
kitanbo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3792-5854>



Larisa I. Auzina,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Hydrogeology Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ lauzina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Аузина Лариса Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
руководитель лаборатории гидрогеологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ lauzina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Contribution of the authors / Вклад авторов

Agegnehu K. Yoshe – data curation, methodology, visualization, writing – original draft.

Larisa I. Auzina – conceptualization, supervision, writing – editing.

А.К. Йоше – курирование данных, разработка методологии, визуализация, написание черновика рукописи.

Л.И. Аузина – разработка концепции, научное руководство, редактирование рукописи.

Conflict of interests / Конфликт интересов

Larisa I. Auzina has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2018, but she did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interests.

Аузина Л.И. является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2018 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 06.03.2025.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 06.03.2025.



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

Научная статья

УДК 504.05

EDN: QLAIMO

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-77-87



Особенности и оценка оползневой опасности на территории города Москвы

Е.А. Крахина^a, В.Н. Экзарьян^b

^{a,b}Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

Резюме. В процессе исследования был проведен анализ отечественных классификаций оползневых процессов, в ходе которого были рассмотрены различные аспекты этого явления. Особое внимание уделялось таким параметрам, как механизм проявления оползней, их морфологические характеристики, преобладающие склоновые факторы, степень потери устойчивости пород, а также расположение, строение и форма оползня в плане. Изучены условия для проявления оползней глубокого и поверхностного типов залегания на территории города Москвы. Представлены результаты экспертного опроса, на основе которого выделены таксономические признаки. Составлена типизация факторов по степени активности оползневых участков на территории Москвы. Целью исследования являлись обобщение и систематизация основных таксономических единиц оползневых процессов, развитых на территории Москвы, с выявлением единых закономерных признаков и таксонов изучаемого процесса. В статье рассмотрены аналитические методы выделения таксономических единиц отечественных оползневых классификаций и возможности их применения для оползневых процессов Московского региона. Объектом исследования являлись оползни Москвы, предметом – изучение факторов и условий, оказывающих воздействие на активность оползневых процессов. Проведенная экспертная оценка позволила распределить факторы и условия по степени их воздействия на активность оползневых участков на территории Москвы. В результате было установлено 25 факторов (соответствуют таксону «тип»), оказывающих воздействие на состояние склона, которые были распределены по классам условий (суммарное количество – 9). Несколько классов были объединены в таксон выше рангом (группа). В составленной типизации в зависимости от длительности воздействия фактора на оползневой склон было выделено 3 группы.

Ключевые слова: оползневые процессы, типизация факторов и условий, степень, активность, таксоны, экспертная оценка

Для цитирования: Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Особенности и оценка оползневой опасности на территории города Москвы // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-77-87>. EDN: QLAIMO.

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

Original article

Features and assessment of landslide hazard in Moscow

Elena A. Krakhina^a, Vladimir N. Ekzarian^b

^{a,b}Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract. An analysis of domestic classifications of landslide processes is carried out including the study of various aspects of this phenomenon. Special attention is paid to such parameters as the mechanism of landslide manifestation, landslide morphological characteristics, prevailing slope factors, degree of rock stability loss, as well as landslide location, structure and shape in the plan. The manifestation conditions of deep and surface landslides on the territory of the city of Moscow are studied. The results of an expert survey, on the basis of which taxonomic features have been identified, are presented. The classification of factors according to the activity degree of landslide sites in Moscow has been compiled. The purpose of the study is to generalize and systematize the main taxonomic units of landslide processes developed on the territory of Moscow as well as to identify uniform regular features and taxa of the studied process. The article discusses analytical methods for identifying taxonomic units of domestic landslide classifications and their application potential for Moscow region landslide processes. The object of the study is Moscow landslides. The subject is the study of factors and

conditions influencing the activity of landslide processes. Conducted expert assessment made it possible to distribute the factors and conditions according to their impact degree on landslide site activity in the territory of Moscow. As a result, 25 factors ("type" taxon) affecting the condition of the slope and distributed by classes of conditions (the total number is 9) have been identified. Several classes have been combined into a taxon with a higher rank (group). The compiled classification features 3 groups distinguished according to the duration of the factor's impact on the landslide slope.

Keywords: landslide processes, classification of factors and conditions, degree, activity, taxa, expert assessment

For citation: Krakhina E.A., Ekzarian V.N. Features and assessment of landslide hazard in Moscow. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):77-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-77-87>. EDN: QLAIMO.

Введение

В.А. Жуков в своем докладе «Оползневые явления Московской области» [1], представленном на Первом Всесоюзном оползневом совещании (состоялось в Нижнем Кастрополе (Крым) в 1934 г.), посвященном подведению итогов изученности оползней Московского региона, выделил группу оползней, связанных с песчано-глинистыми породами четвертичной системы и заключенными в них подземными водами. Оползневые процессы характеризуются как небольшие по масштабам с неглубоким захватом пород от 5 до 10 м, включающие все три типа оползней по классификации, предложенной Ф.П. Саваренским (инсекVENTНЫЕ, консекVENTНЫЕ и асекVENTНЫЕ). Процессы оползания грунтовой массы по склону происходили по горизонтам ледниковых морен, юрским или меловым глинам. Создание Московской оползневой партии (1954 г.) положило начало для стационарного изучения развития глубоких оползней в таких районах города Москвы, как Воробьевы горы (ранее – Ленинские), Фили-Кунцево и Коломенское.

Основным толчком для развития исследований оползневых процессов на территории Москвы послужило формирование и проявление деформаций на восточном крае склона Воробьевых гор вблизи главного здания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в районе современной смотровой площадки, а также строительство Международного Красного стадиона. После основательного проведения инженерно-геологических изысканий воздвижение спортивного стадиона пришлось приостановить.

В 1936–1937 гг. были опубликованы труды Б.М. Даньшина [2], связанные с проявлением оползневых процессов на территории Москвы. В работах уточнялось геологическое строение Воробьевых гор и подводился итог по ранее накопленным материалам и данным о развитии и проявлении процесса на этом участке. Основываясь на предположении, что оползневая зона опускается ниже уровня реки

Москвы, был сделан вывод о том, что смещение грунтовых масс происходило не в современную, а в более углубленную погребенную долину, образовавшуюся на границе ледниковой и современной эпох. Состояние склона в описываемый период оценивалось как неустойчивое.

С 1960 г. специалистами и учеными в области инженерной геологии К.А. Гулакяном, В.В. Кюнцель [3, 4], Е.П. Емельяновой, М.Н. Парецкой, Г.П. Постоевым были изучены такие крупные оползневые участки Москвы, как Фили, Коломенское, Хорошево. С постепенным накоплением теоретических знаний сформировались различные точки зрения о возрасте основных оползневых участков на территории города.

Целями проведенного исследования являлись обобщение и систематизация основных таксономических единиц оползневых процессов для территории Москвы и выявление взаимосвязей, единых закономерных признаков и таксонов. В соответствии с поставленными целями были определены и решены следующие задачи: исследование специфики влияния различных факторов на склонные к оползанию участки, выявление ключевых факторов и условий, влияющих на активность оползневых зон, установление таксономических единиц для создания типологии оползней на территории Москвы.

С 1954 г. начала работать Московская оползневая партия (сейчас – Инженерно-геологическая оползневая партия), организованная в целях оценки состояния оползневых участков и проведения детальных стационарных наблюдений за развитием процесса, а также изучения режимов оползнеобразующих факторов. Проведенные работы позволили выявить современный возраст оползневых участков на территории города, а также установить ряд закономерностей, связанных с их развитием и генезисом: тип по механизму (оползни выдавливания), основной деформирующий горизонт (глины оксфордского яруса),



основной оползнеобразующий фактор (эррозионная деятельность рек в основании склона), продолжительность оползневого цикла.

Материалы и методы исследования

На основе анализа таксономических признаков оползней из классификаций, разработанных такими отечественными учеными в областях инженерной геологии, геоморфологии и грунтоведения, как М.К. Рзаева [16], Г.П. Постоев [15], И.В. Попов¹, Г.С. Золотарев² [5, 6], Ф.П. Саваренский [7], Н.В. Родионов [8], А.П. Павлов [9], Н.Н. Маслов³, В.В. Кюнцель [10] и Е.П. Емельянова [11], был выделен ряд ключевых факторов и условий, оказывающих воздействие на деформационные процессы внутри склона. В табл. 1 приведены систематизированные материалы сопоставления классификаций оползневых процессов и выявлены взаимосвязи между таксономическими показателями [12].

Для углубления анализа факторов, действующих на оползневые участки, важным аспектом является детальное изучение и понимание механизмов перемещения массива горных пород вниз по склону, процессов формирования и распределения деформаций в различных геологических и гидрогеологических условиях, грунтовой толщи. Изучение классификаций, представленных отечественными учеными, и сопоставление таксономических единиц оползневых процессов позволило выявить ряд взаимосвязанных параметров. Обозначение основных таксонов в рассматриваемом процессе базируется на основе одного или нескольких признаков (действующих на активность процесса) с учетом локальных условий их образования и развития [13].

Основополагающим фактором, применяющимся при выделении таксономических единиц оползневого процесса, является масштаб проявления в грунтовой толще, слагающей склон. Исходя из выделенного фактора и геолого-гидрологических особенностей Москвы, выделяются два типа оползневых участков – глубокие и мелкие (поверхностные) [14] (табл. 2), для каждого из которых характерен определенный ряд условий.

При возрастающей техногенной нагрузке городской инфраструктуры на геологическую среду появляются новые условия, обусловливающие формирование и активизацию оползневых процессов [15, 16]:

1. Проведение строительства и ввода в эксплуатацию зданий и сооружений (достаточно габаритных и массивных) различного назначения в значительной близости от бровки оползневого склона.
2. Создание в верхней части склонового участка дополнительной нагрузки.
3. Подрезка основания склона.
4. Недостаток или отсутствие дренажных и водосливных сооружений на склоновых участках.
5. Создание сети инженерных коммуникаций различного назначения.

6. Проектирование и прокладка автомобильных трасс и дорог вблизи бровки оползневого склона.

Рассматриваемые классификации оползневых процессов (В.Д. Ломтадзе, М.К. Рзаева [17], Г.В. Постоев [18], И.В. Попов, Г.С. Золотарев, Ф.П. Саваренский, Н.В. Родионов, А.П. Павлов, Н.Н. Маслов, В.В. Кюнцель [19, 20], Е.П. Емельянова [11]) носят генерализованный характер и являются базовыми (основополагающими). В частности, В.Д. Ломтадзе⁴ предложил классификацию оползней, в основу которой были положены особенности движения горных пород, по таким основным признакам, как причина нарушения равновесия, динамика развития явления и его масштаб. Ученым были выделены четыре группы явлений и восемь видов:

1. Оползни:
 - структурные;
 - пластичные;
 - структурно-пластичные.
2. Оползни-обвалы:
 - переход оползней в обвалы.
3. Обвалы:
 - собственно обвалы;
 - вывалы.
4. Осыпи:
 - щебнистые;
 - песчано-дресвяные.

В своей классификации В.Д. Ломтадзе учел механизм оползневых смещений, причи-

¹ Попов И.В. Инженерная геология: учебник для вузов. М.: Изд-во МГУ, 1952. 512 с.

² Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика: учебник для вузов. М.: Изд-во МГУ, 1983. 328 с.

³ Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 511 с.

⁴ Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология: учебник для вузов. Л.: Недра, 1978. 496 с.



Таблица 1. Классификации оползневых процессов, разработанные отечественными учеными
Table 1. Landslide classifications developed by domestic scientists

Классификационные показатели									
по механизмам проявления процесса		по признакам преобладающих силовых факторов формирования движения	по степени потери устойчивости пород, слагающих склон	по расположению на склоне	по строению склона и относительно положения склонности скольжения	по форме оползня в плане			
М.К. Рзаева	В.В. Кюнцель	Г.С. Золотарев	Н.Н. Маслов	Г.П. Постоев	Н.В. Родионов	И.В. Попов	Ф.П. Саваренский	Е.П. Емельянова	
Блоковые (резающие)	–	Обвалы	Блоковые	Структурные	–				
Соскальзывания	Скользжения	Соскальзывания (консеквентные)	Скользжения	Консеквентные	Делеписивные	Консеквентные			
Столзания	–	–	Сдвиги – скольжения	–	–	–			
Выдавливания	Выдавливания	Выдавливания (детрузивные)	Сдвиги	–	Детрузивные	Асеквентные			
Выплывания (суффозионные)	Выплывания	Суффозионные Выплывания	–	Суффозионные	–	Суффозионные			
Просадочные	Просадочные	–	–	–	–	–	Просадка в лессовых грунтах		
Оплывины (сплавы)	–	Сплавы	Сплавы Оплывины	–	–	–	Выплывания плывинов (оплывины)		
Разжижения	Разжижения	Разжижения	–	Разжижения – течения	–	–	Подземного разжижения и размыва		
Течения (потоки)	Течения	Потоки	Потоки	–	–	–	Промежуточные		



Таблица 2. Условия, характерные для выделения типов оползневых процессов
Table 2. Conditions typical for landslide type identification

Оползни глубокого типа	Оползни поверхностного (мелкого) типа
Наличие вертикального нарушения в структуре грунтовой толщи, слагающей склон	Диапазон значений по протяженности склона составляет от 20 до 80 м
Диапазон значений крутизны склона составляет от 9 до 17°	Диапазон значений крутизны склона составляет от 28 до 30°
Залегание кровли юрской системы (глин оксфордского яруса) на урезе реки составляет от ±2 до 5 м	Залегание в геологическом пласте подземных вод
Высота склона должна превышать показатель в 15 м	
Проявление эрозионных процессов, сформировавшихся под воздействием поверхностных водотоков, расположенных в основании склона	

ны нарушения устойчивости пород, состояние склонов, динамику, размеры оползней и направление защитных мероприятий.

Анализируя базовые классификации и учитывая регионально-геологические, зонально-климатические и техногенные условия Московского региона был составлен перечень факторов и условий, влияющих на активность оползней. Для оценки степени их влияния на активность протекающих в Москве оползневых процессов был применен экспертный метод. В первую группу экспертов вошли 12 докторов и кандидатов геолого-минералогических наук, занимающихся изучением оползневых процессов [21]. Вторая группа состояла из 30 студентов 3–4 курсов кафедры экологии и природопользования Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе. Эксперты распределили приведенные факторы на пять групп по степени их воздействия на оползневой про-

цесс. Выделенные типы подразделялись на три категории по степени воздействия на состояние склонов (сильная, средняя, слабая), к четвертой категории относились факторы, влияющие на активность оползневого процесса.

По длительности воздействия факторов на оползневой процесс было выделено 3 группы – постоянные, медленно изменяющиеся и быстро изменяющиеся. Каждая группа подразделялась на классы по характеру происхождения условий: геологические, геоморфологические, гидрогеологические, биологические, почвенные, метеорологические, гидрологические, инженерно-геологические и техногенные. Установленные таксоны и признаки представлены в табл. 3.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в ходе проведения экспертной оценки данные были обработаны, на их

Таблица 3. Выделенные таксоны для составления типизации факторов и условий, определяющих степень активности оползней
Table 3. Selected taxa for classification of factors and conditions determining landslide activity degree

Таксон	Наименование	Характеристика (признак)
Категория	Сильная	Степень воздействия фактора на состояние оползневого склона
	Средняя	
	Слабая	
Группа	Постоянные	Длительность воздействия фактора на оползневой процесс
	Медленно изменяющиеся	
	Быстро изменяющиеся	
Класс	Геологические	Подразделение по характеру происхождения факторов и условий, определяющих активность оползневого процесса
	Геоморфологические	
	Гидрогеологические	
	Биологические	
	Почвенные	
	Метеорологические	
	Гидрологические	
	Инженерно-геологические	
	Техногенные	
Тип	Наименование факторов, оказывающих воздействие на степень активности оползневого склона	

основе проведена и представлена в виде схемы (рисунок) классификационная типизация факторов, определяющих степень активности оползневых процессов Московского региона. К геологическим факторам, оказывающим сильное и постоянное воздействие на оползневой склон, относятся геологическое строение и направление падения пород по отношению к склону.

В геоморфологическом классе факторов сильную и постоянную степень воздействия на оползни оказывает крутизна склона. Среднюю степень воздействия на активность оползней города Москвы в рассматриваемом классе оказывают три типа факторов – уклон тальвега, уровень перепада высот рельефа, степень расчленения территории. В группе медленно изменяющихся факторов по результатам экспертной оценки сильную степень воздействия на активность оползней оказывают два фактора: перенасыщение горных слагающих склон пород водой, глубина залегания грунтовых и подземных вод. К категории средней степени воздействия на активность оползневых процессов относятся главным образом показатели гидрогеологических, геоморфологических и биологических классов. В гидрогеологическом классе к средней степени влияния на оползневой процесс отнесены по результатам экспертного опроса два типа факторов: особенности режима; подмыв пород, слагающих склон, вследствие колебаний базиса эрозии.

В биологическом классе к средней степени влияния на оползневой процесс отнесены по результатам экспертного опроса два типа факторов:

- размеры корневых систем древесной растительности;
- колебания влажного и термического режимов растений.

В геоморфологическом классе к средней, но постоянной степени влияния на оползневой процесс отнесены следующие факторы:

- уклон тальвегов;
- уровень перепада высот рельефа;
- степень расчлененности территории.

В группе медленно развивающихся факторов слабую степень воздействия на оползневой склон оказывают по мнению экспертов:

- гидрогеологические условия (химический состав подземных вод);
- биологические показатели (вес массы деревьев);
- характер почвенного покрова (тип почв).

К группе быстроизменяющихся факторов, оказывающих сильное воздействие на активность оползневого склона, относятся следующие классы по характеру происхождения условий:

- 1) метеорологические: количество атмосферных осадков;
- 2) геологические: влажность горных пород, прочностные и деформационные свойства пород;
- 3) антропогенные: подрезка склона, статистические и динамические нагрузки на склон.

Гидрологические условия оказывают среднюю степень воздействия на оползневой склон, выделяется один тип фактора – склоновый сток. В антропогенном классе один тип фактора также оказывает среднюю степень воздействия – это вырубка лесных массивов.

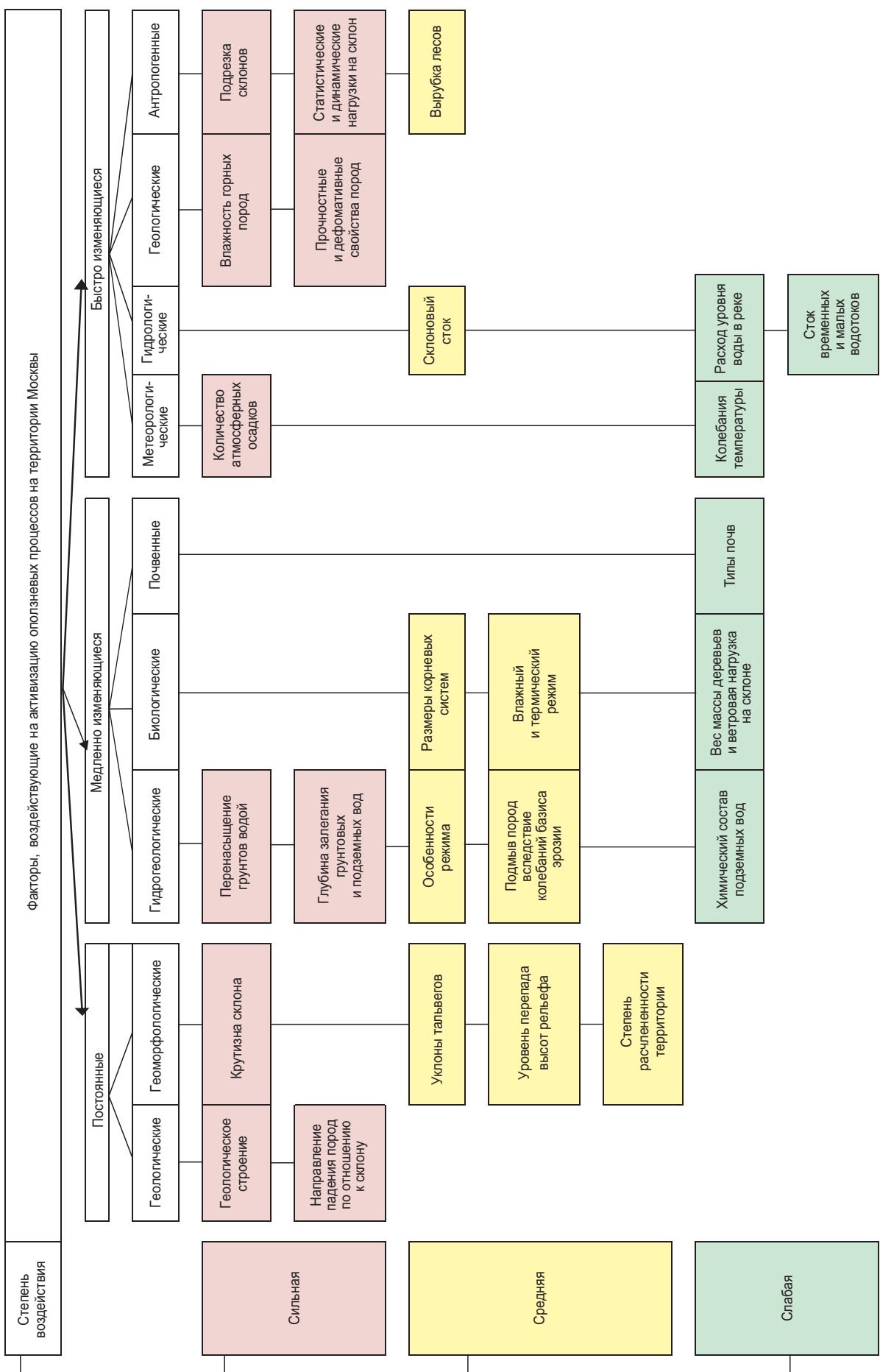
Слабую степень воздействия на оползневой процесс в группе быстродействующих факторов оказывают:

- колебания температуры (метеорологический класс);
- расход уровня воды в реке и сток временных и малых водотоков (гидрологический класс).

Смещение массива горных пород, слагающих склон, при проявлении оползневого процесса обуславливает развитие деформаций с последующей потерей устойчивости грунтов. Разрушение оползневого склона происходит, когда сдвигающая составляющая силы тяжести превышает прочность грунтов по поверхностям или зонам ослабления породы, приводя к нарушению устойчивости всего грунтового массива.

Влияние рельефа на характер и интенсивность оползней может быть прямым и косвенным. Прямое влияние оказывают крутые склоны, морфология речных долин. Косвенное воздействие рельефа на развитие рассматриваемых процессов проявляется в качестве одного из компонентов географической среды, который в значительной мере определяет характер и пространственное распределение циркуляции воздушных масс, атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод, растительного покрова.

Разработанная и предложенная в данной работе классификация факторов оползневых процессов является основой для дальнейшего развития регионального оползневедения и может быть использована в методических рекомендациях по проведению режимных



Типизация факторов и условий по степени активности оползневых участков на территории города Москвы
Classification of factors and conditions according to the activity degree of landslide sites in the territory of the city of Moscow

(мониторинговых) наблюдений за оползнями Московского региона. Кроме этого, рассмотренные факторы (см. рисунок) лягут в основу построения прогнозных математических моделей оползневых процессов, развитых в Московском регионе.

Заключение

Вычленяя оползневые формы в рельефе, описывая их специфические проявления, определяя стадии развития выявленных деформаций, можно достаточно детально изучить основной механизм смещений, свойства и структуру породы, степень подверженности материала деформированию, что позволяет выявить общие закономерности между существующими классификациями (см. табл. 1).

По масштабу проявления, были выделены два типа оползневых участков:

- глубокие – подразделяющиеся по степени проявления процесса на активные и стабильные (приуроченные к русской части или к речным террасам реки Москвы);
- мелкие (поверхностные), подразделяющиеся на сильно и слабо пораженные оползнями (наблюдаются в пределах долинного комплекса реки Москвы и ее притоков).

Проведенная экспертная оценка позволила распределить факторы и условия по степе-

ни их воздействия на активность оползневых участков на территории города Москвы. Было установлено 25 факторов (соответствует выделенному таксону «типа»), оказывающих воздействие на состояние склона, каждый из которых был распределен в класс условий (суммарное количество – 9). Несколько классов были объединены в группу (таксон выше рангом).

В составленной типизации в зависимости от длительности воздействия фактора на склон было выделено 3 группы. К группе постоянных факторов были отнесены 2 класса условий – геологические и геоморфологические, к медленно изменяющимся – 3 класса: гидрогеологические, биологические и почвенные, а к группе быстро изменяющихся отнесли метеорологические, гидрологические, геологические, антропогенные условия (4 класса).

Основным таксономическим признаком, является степень воздействия фактора на активность оползневого участка (категория). Разработанная классификация факторов, определяющих степень активности оползневых процессов Московского региона, является основой для построения прогнозных математических моделей изучаемого процесса, а ее результаты могут быть использованы для совершенствования методических и нормативных документов по изучению оползней.

Список источников

1. Жуков В.А. Оползневые явления Московской области // Труды Первого Всесоюзного оползневого совещания. Л.; М.: Онти, 1935.
2. Даньшин Б.М. Геологическое строение Ленинских гор в связи с некоторыми вопросами стратиграфии отложений меловой системы и оползневыми явлениями на берегу Москва-реки // Известия Московского геологического треста. 1937. Т. 4. С. 8–22.
3. Гулакян К.А., Кюнцель В.В. Классификация оползней по механизму их развития // Вопросы изучения оползней и факторов, их вызывающих. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1970. Т. 29. С. 58–64.
4. Кюнцель В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР. М.: Недра, 1980. 213 с.
5. Золотарев Г.С. Генетические типы оползней, их развитие и изучение // Материалы совещания по изучению оползней и мер борьбы с ними. Киев: Изд-во КГУ, 1964. С. 165–170.
6. Золотарев Г.С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов и значение истории их формирования для оценки устойчивости // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем имени Ф.П. Саварнского Академии наук СССР. 1961. Т. 35.
7. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней // Труды Первого Всесоюзного оползневого совещания. Л.; М.: ОНТИ, 1935. С. 29–37.
8. Родионов Н.В. К вопросу о классификации оползневых явлений // Труды Московского геологоразведочного института им. Орджоникидзе. 1939. Т. 15. С. 197–205.
9. Павлов А.П. Оползни Симбирского и Саратовского Поволжья. М.: Университетская типография, 1903. 69 с.
10. Кюнцель В.В. О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1965. Т. XL. № 3. С. 93–100.
11. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
12. Крахина Е.А. Типизация оползневых участков города Москвы // Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли – 2023: сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 12–13 октября 2023 г.). М.: Изд-во МГСУ, 2023. С. 51–57. EDN: MICTAR.



13. Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Анализ таксономических единиц существующих классификаций оползневых процессов // Молодые – наукам о Земле: сб. трудов XI Междунар. науч. конф. молодых ученых (г. Москва, 3–4 апреля 2024 г.). М.: Изд-во МГРИ, 2024. С. 40–43. EDN: JYXDBB.
14. Парецкая М.Н. Зависимость морфологии оползней выдавливания Подмосковья от прочности юрских глин // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии. 1975. Вып. 81. С. 94–97.
15. Alekseev A.S., Goreva N.V. Conodont zonation for the type Kasimovian and Gzhelian stages in the Moscow Basin, Russia // Proceedings of the 15th International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences / ed. T.E. Wong. Amsterdam: Editia-KNAW, 2007. P. 229–242.
16. Samarin E.N., Zerkal O.V. Paleolandslides in valley of Kunya-river and their influencing on modern slope instability // Landslides: Evaluation & Stabilization: Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides / eds W. Lacerda, M. Ehrlich, S.A.B. Fontoura, A.S.F. Sayao. Rotterdam: Balkema, 2004. Vol. 1. P. 243–249.
17. Постоев Г.П. Основные характеристики и признаки проявлений оползней // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 2. С. 140–148. EDN: MDWWPF.
18. Рзаева М.К. Об инженерно-геологических типах оползней // Инженерные изыскания для строительства. 1969. Сер. 2. № 1. С. 79–86.
19. Кунтцель В.В. О развитии оползней в парке Фили-Кунцево // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии. 1964. Вып. 26. С. 131–135.
20. Кунтцель В.В. Эрозия берегов реки Москвы и ее влияние на оползневые процессы // Разведка и охрана недр. 1962. № 3. С. 41–45.
21. Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Типизация факторов, определяющих степень активности оползневых процессов в городе Москве // Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли – 2004: сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 24–25 октября 2024 г.). М.: Изд-во МГСУ, 2024. С. 97–103. EDN: VFVGCV.

References

1. Zhukov V.A. Landslide phenomena in the Moscow region. In: *Trudy Pervogo Vsesoyuznogo opolznevogo soveshchaniya = Proceedings of the 1st All-Union Landslide Conference*. Leningrad; Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 1935. (In Russ.).
2. Dan'shin B.M. Geological structure of the Lenin Hills and some stratigraphy issues of Cretaceous system deposits and landslide phenomena on the banks of the Moskva river. *Izvestiya Moskovskogo geologicheskogo tresta*. 1937;4:8-22. (In Russ.).
3. Gulakyan K.A., Kyunttsel' V.V. Landslide classification by their development mechanism. In: *Voprosy izucheniya opolznei i faktorov, ikh vyzyvayushchikh = Issues of studying landslides and factors causing them*. Moscow: All-Union Scientific Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology; 1970, vol. 29, p. 58–64. (In Russ.).
4. Kyunttsel' V.V. *Landsliding patterns in the European territory of the USSR*. Moscow: Nedra; 1980, 213 p. (In Russ.).
5. Zolotarev G.S. Genetic types of landslides, their development and study. In: *Materialy soveshchaniya po izucheniyu opolznei i mer bor'by s nimi = Proceedings of the meeting on landslide study and measures to combat them*. Kiev: Kiev State University; 1964, p. 165–170. (In Russ.).
6. Zolotarev G.S. Engineering and geological study of shore slopes and the significance of their formation history for stability assessment. In: *Trudy Laboratori gidrogeologicheskikh problem imeni F.P. Savarsnskogo Akademii nauk SSSR = Proceedings of the F.P. Savarnsky Laboratory of Geological Problems of the Academy of Sciences of the USSR*. 1961, vol. 35. (In Russ.).
7. Savarenetskii F.P. Experience of landslide classification development. In: *Trudy Pervogo Vsesoyuznogo opolznevogo soveshchaniya = Proceedings of the 1st All-Union Landslide Conference*. Leningrad; Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 1935, p. 29–37. (In Russ.).
8. Rodionov N.V. On landslide phenomena classification. In: *Trudy Moskovskogo geologorazvedochnogo instituta = Proceedings of the Moscow Geological Prospecting Institute*. 1939, vol. 15, p. 197–205. (In Russ.).
9. Pavlov A.P. *Landslides of the Simbirsk and Saratov Volga regions*. Moscow: Universitetskaya tipografiya; 1903, 69 p. (In Russ.).
10. Kyunttsel' V.V. On the age of Moscow and Moscow region deep landslides associated with Jurassic clay deposits. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*. 1965;XL(3):93-100. (In Russ.).
11. Emel'yanova E.P. *Basic patterns of landslide processes*. Moscow: Nedra; 1972, 308 p. (In Russ.).
12. Krakhina E.A. Typification of landslide areas in Moscow. In: *Geohkologicheskie problemy tekhnogenennogo etapa istorii Zemli – 2023: sbornik trudov Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Geoeological problems of the technogenic stage of the Earth's history – 2023: collected works of the International scientific and practical conference. 12–13 October 2023, Moscow*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2023, p. 51-57. (In Russ.). EDN: MICTAR.
13. Krakhina E.A., Ehkzar'yan V.N Analysis of taxonomic units of existing landslide classifications. In: *Molodye – Naukam o Zemle: sbornik trudov XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh = Young People – to Earth sciences: collected works of the 11th International scientific conference of young scientists. 3–4 April 2024, Moscow*. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 2024, p. 40-43. (In Russ.). EDN: JYXDBB.

14. Paretskaya M.N. Dependence of pressure landslide morphology in the Moscow region on Jurassic clay strength. In: *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrogeologii i inzhenernoi geologii = Proceedings of the All-Union Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology*. 1975, Iss. 81, p. 94-97. (In Russ.).
15. Alekseev A.S., Goreva N.V. Conodont zonation for the type Kasimovian and Gzhelian stages in the Moscow Basin, Russia. In: Wong T.E. (ed.). *Proceedings of the 15th International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*. Amsterdam: Edita-KNAW; 2007, p. 229-242.
16. Samarin E.N., Zerkal O.V. Paleolandslides in valley of Kunya-river and their influencing on modern slope instability. In: Lacerda W., Ehrlich M., Fontoura S.A.B., Sayao A.S.F. (eds). *Landslides: Evaluation & Stabilization: Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides*. Rotterdam: Balkema; 2004, vol. 1, p. 243-249.
17. Postoev G.P. The main features and indications of landslide development. *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2010;2:140-148. (In Russ.). EDN: MDWWPF.
18. Rzaeva M.K. On engineering and geological types of landslides. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva*. 1969;2(1):79-86. (In Russ.).
19. Kyunttsel' V.V. On landslide development in the Fili-Kuntsevo park. In: *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta hidrogeologii i inzhenernoi geologii = Proceedings of the All-Union Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology*. 1964, Iss. 26, p. 131-135. (In Russ.).
20. Kyunttsel' V.V. Moskva river banks erosion and its impact on landslide processes. *Prospect and protection of mineral resources*. 1962;3:41-45. (In Russ.).
21. Krakhina E.A., Ekhzar'yan V.N. Typification of factors determining landslide activity degree in Moscow. In: *Geohkologicheskie problemy tekhnogennogo etapa istorii Zemli – 2004: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Geoecological problems of the technogenic stage of the Earth's history – 2004: collected works of the International scientific and practical conference*. 24–25 October 2024, Moscow. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2024, p. 97-103. (In Russ.). EDN: VFVGCV.

Информация об авторах / Information about the authors



Крахина Елена Александровна,
аспирант,
Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
✉ I.k98@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8043-3740>

Elena A. Krakhina,
Postgraduate Student,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
✉ I.k98@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8043-3740>



Экзарьян Владимир Нишанович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой экологии и природопользования,
Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
vnekzar@rambler.ru
<https://orcid.org/0009-0003-8521-6715>

Vladimir N. Ekzarian,
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor,
Head of the Ecology and Environmental Management Department,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
vnekzar@rambler.ru
<https://orcid.org/0009-0003-8521-6715>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Е.А. Крахина – проведение исследования, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

В.Н. Экзарьян – научное руководство, разработка концепции.

Elena A. Krakhina – investigation, validation, visualization, writing – original draft.

Vladimir N. Ekzarian – supervision, conceptualization.



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 20.02.2025; одобрена после рецензирования 12.03.2025; принятa к публикации 21.03.2025.

The article was submitted 20.02.2025; approved after reviewing 12.03.2025; accepted for publication 21.03.2025.



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

Научная статья

УДК 551.37

EDN: JEDUPM

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-88-100



Выявление турбидитовых коллекторов в бассейне Кот-д'Ивуар и прогноз их характеристик на основе 3D-сейсморазведки

Д.Л.А. Онамун^{a✉}, А.Г. Дмитриев^b^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Гвинейский залив, в частности осадочный бассейн Кот-д'Ивуара, в последние десятилетия является объектом интенсивных геологического-разведочных работ и крупных открытий месторождений углеводородов. Бассейн расположен в северной части Гвинейского залива, глубина воды составляет более 3000 м. В бассейне имеются идеальные условия для формирования углеводородной системы. Проведенное исследование касается блока RUS-CIV площадью 2600 км², из которых 1545 км² было покрыто 3D сейсмической съемкой. Целью проведенной работы являлась качественная оценка свойств турбидитовых резервуаров в толщах верхнего мела. Доступный набор сейсмических данных представлял собой трехмерный сейсмический куб с данными временной миграции до суммирования и повторно обработанными данными глубинной миграции до суммирования, охватывающими основную область исследования. В процессе работы использовались программное обеспечение Kingdom SMT, а также карты атрибутов, наилучшим образом соответствующих обнаружению канала (относительный акустический импеданс и вторая производная его огибающей). Карта такого атрибута, как глинистый индикатор, помогла оценить содержание глинистых пород в каналах. Благодаря проведенной работе была продемонстрирована эффективность анализа сейсмических атрибутов для оптимизации прогнозирования и описания характеристик месторождений углеводородов. Интерпретация геологических событий на данном этапе носила качественный характер. В результате было рекомендовано обратить внимание на области, выявленные посредством кросс-плот-анализа, и углубить предварительный этап анализа путем проведения количественного исследования.

Ключевые слова: Гвинейский залив, осадочный бассейн Кот-д'Ивуар, сейсмические атрибуты, турбидитовые каналы, верхний мел, ловушка, резервуар

Для цитирования: Онамун Д.Л.А., Дмитриев А.Г. Выявление турбидитовых коллекторов в бассейне Кот-д'Ивуар и прогноз их характеристик на основе 3D-сейсморазведки // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 88–100. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-88-100>. EDN: JEDUPM.

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

Original article

Identification of Côte d'Ivoire basin turbidite reservoirs and their characteristics prediction based on 3D seismic survey

Désiré Lucien Ayémoun Onamoun^{a✉}, Alexander G. Dmitriev^b^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The Gulf of Guinea, and in particular the sedimentary basin of Côte d'Ivoire, has recently been the subject of intensive geological exploration and major discoveries of hydrocarbon deposits. The basin is located in the northern part of the Gulf of Guinea, with the water depth of over 3,000 m. The basin has ideal conditions for hydrocarbon system formation. The study deals with the RUS-CIV block with the area of 2,600 km², whereas 1,545 km² of which has been subjected to 3D seismic surveying. The purpose of the work is qualitative assessment of turbidite reservoir properties in the Upper Cretaceous strata. The available seismic dataset is presented as a three-dimensional seismic cube with prestack time migration data and reprocessed prestack deep migration data covering the main research area. The study uses Kingdom SMT software and attribute maps that best match the channel detection (relative acoustic impedance and the second derivative of its envelope). The shale indicator attribute map enabled estimation of the clay content in the channels. The work demonstrates the efficiency of seismic attribute analysis to optimize prediction and description of hydrocarbon de-

© Онамун Д.Л.А., Дмитриев А.Г., 2025



posit characteristics. The interpretation of geological events at this stage is qualitative. As a result, it is recommended to pay attention to the areas identified through the scatter plot analysis and to deepen the preliminary stage of analysis by conducting a quantitative study.

Keywords: Gulf of Guinea, Côte d'Ivoire sedimentary basin, seismic attributes, turbidite channels, Upper Cretaceous, trap, reservoir

For citation: Onamoun D.L.A., Dmitriev A.G. Identification of Côte d'Ivoire basin turbidite reservoirs and their characteristics prediction based on 3D seismic survey. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):88-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-88-100>. EDN: JEDUPM.

Введение

Лицензионный участок (блок) RUS-CIV расположен в глубоководной зоне бассейна Кот-д'Ивуар в северной части Гвинейского залива с глубиной воды более 3000 м. Бассейн имеет идеальные условия для формирования активной углеводородной системы с оптимальной разработкой нефтематеринских пород (НП) и комплексов осадконакопления резервуаров. Подтвержденные крупные скопления показали, что в этом хорошо изученном бассейне в отложениях мелового периода на континентальной коре обнаружены значительные объемы углеводородов. Площадь исследованного блока составляет 2600 км², 1545 км² которой было покрыто 3D сейсмической съемкой. После открытия таких крупных месторождений, как Баобаб (2001 г., запасы нефти составляют 700 млн баррелей) и Джубили (2007 г., запасы нефти – 370 млн баррелей), а также ряда средних по запасам месторождений (Сафир, Пан, Балэн и др.), с приходом крупных мировых нефтяных компаний (Total S.I., «Лукойл» и др.), разведка в этом бассейне возросла в геометрической прогрессии.

Материалы и методы исследования

Современные представления о геологическом строении исследованного региона и его перспективности на месторождения углеводородов основаны на результатах высокоточных гравиметрических [1] высококачественных 3D сейсмических съемок [2, 3], а также масштабных буровых работ. Бассейн Кот-д'Ивуар развивался с момента открытия Атлантики с трансформным рифтингом, начавшимся в позднеюрском и раннемеловом периодах и завершившимся в конце альбского периода образованием океанической коры [4]. К наступлению позднеальбского и раннесеноманского периодов Бразилия и Западная Африка полностью распались, завершив основную фазу тектонического развития вдоль побережья Гвинейского залива [5]. Бассейн разви-

вался в области относительного тектонического покоя между зонами разломов Сен-Поль и Романше, что привело к образованию грабенов с отрывом и интенсивным обломочным заполнением. Широкая зона от шельфа до глубоководья была создана в большей части бассейна, она подкреплена мощной континентальной корой, постепенно истончающейся к переходу континентальной коры в океаническую. В западной части бассейн Кот-д'Ивуара имеет узкую зону от шельфа до глубоководья, которая характеризуется трансформным разломом и начальным развитием грабена, ориентированным субпараллельно современной береговой линии (рис. 1).

Переход континентальной коры в океаническую здесь также более резкий и виден на скорректированных по Буге гравитационных данных [1] в связи с тем, что лежащая под ним зона разлома Сен-Поль создает значительный гравитационный контраст между толстой, высокоплотной континентальной корой на севере и низкоплотной океанической корой непосредственно на юге.

По мере развития рифтинга через весь стратиграфический разрез, представленный древними аптскими озерными алевролитами и глинами, а также более молодыми среднеальбскими окраинно-морскими алеворитами и пелитами, формируются НП. Расширение бассейнов трансформной окраины Р прекратилось в конце альба и сопровождалось повсеместным отложением сеномано-туронских морских глинистых сланцев [7]. Район сформировал непрерывный бескислородный морской разрез, в котором образовалось несколько НП с высоким содержанием общего органического углерода, в период от позднего альба до турона [8].

Исходя из сейсмо-стратиграфической схемы [2], на временных мигрированных разрезах указанные образования проявляются в виде первого регионального отражающего горизонта A_1 , соответствующего кровле отложений нижнего альба, перекрывающего кру-

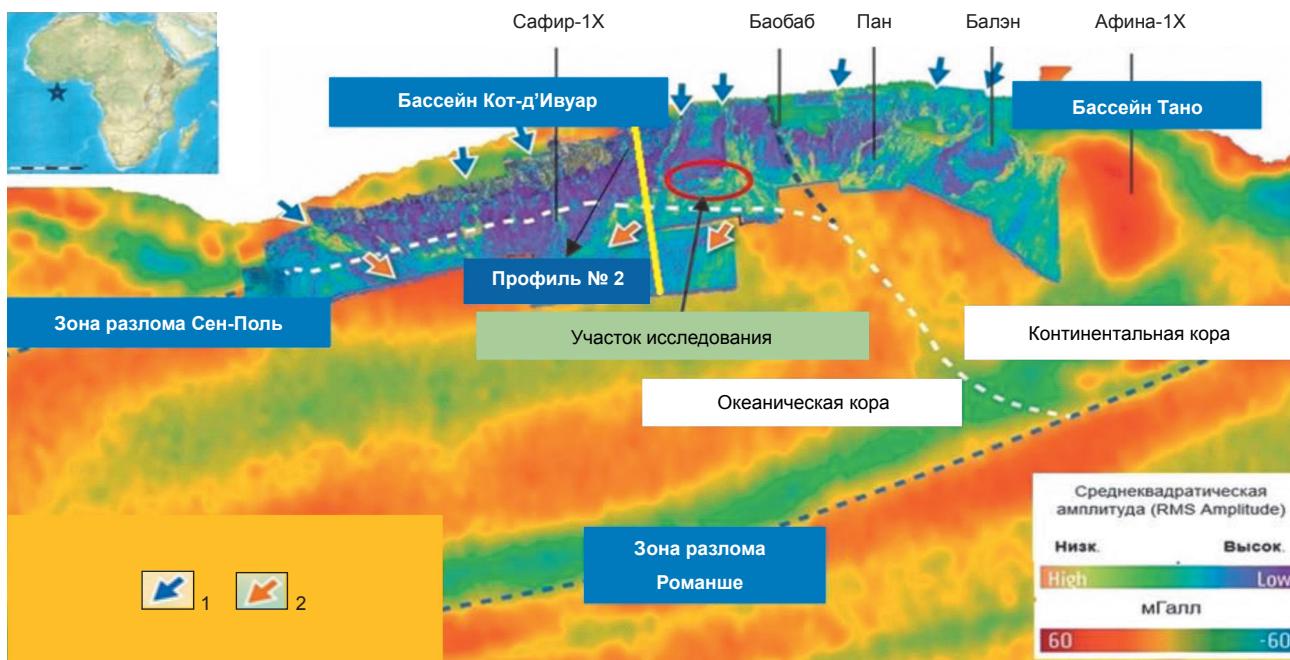


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема и карта изоаномал силы тяжести в редукции Буге северной части Гвинейского залива с сейсмическим профилем № 2 (согласно источникам [2, 6] с изменениями авторов):

1 – точка входа осадка; 2 – система турбидитового канала и конуса выноса

Fig. 1. A structural-tectonic diagram and a gravity isoanomaly map in the Bouguer reduction of the northern part of the Gulf of Guinea with the seismic profile no. 2 (according to sources [2, 6] with authors' alterations):

1 – sediment entry point; 2 – turbidite channel and alluvial fan system

то падающие кулисообразные образования, которые можно отнести к отложениям аптского возраста. В прибрежной зоне аптские отложения залегают на образованиях континентальной коры (рис. 2).

В период сеномана началась поздняя стадия формирования пассивной континенталь-

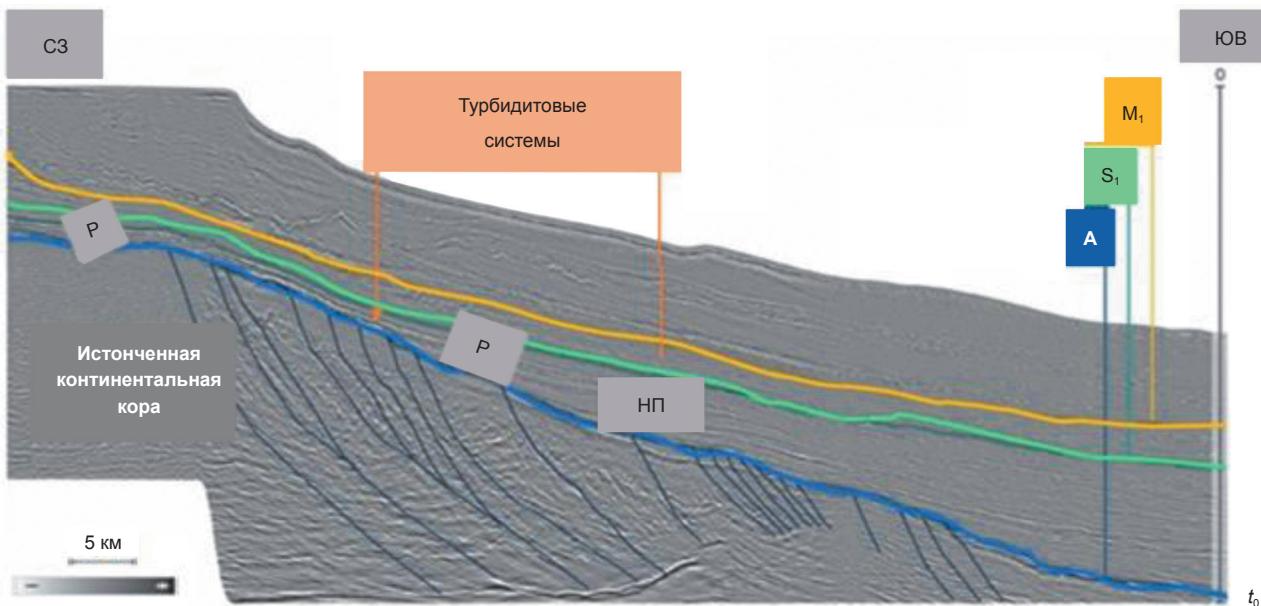


Рис. 2. Фрагмент временного разреза по профилю № 2 в центральной части бассейна Кот-д'Ивуар (согласно источнику [2] с изменениями авторов)

Fig. 2. A fragment of a time section along the profile no. 2 in the central part of the Côte d'Ivoire basin (according to the source [2] with authors' alterations)



ной окраины. Данная стадия была обусловлена охлаждением континентальных участков литосферы, что привело к погружению края Западно-Африканской плиты и формированию глубоководной Ивуарийской впадины. С погружением континентальной окраины и развитием океанического спрединга обстановка осадконакопления становилась все более океанической с увеличением доли пелагических отложений.

Верхнемеловая система наиболее полно представлена в районе и за пределами современного края шельфа. Из-за мощного обломочного слоя, обеспечивающего достаточное захоронение более мелких НП сеномана – турона, разрез в его кровле в сейсмическом волновом поле проявляется в виде отражающего горизонта S_1 , (см. рис. 2). Эти материнские породы имеют смешанный нефтегазовый потенциал [8], дополняющие резервуары (P) из мелководного и глубоководного морского песчаника, отложенные в виде турбидитовых каналов и веерных систем.

Максимальное накопление гемипелагических и пелагических сланцев приходится на палеоцен и эоцен, при этом нижняя граница третичных отложений – верхняя граница маастрихтских отложений проявляется в виде регионального маркирующего отражающего горизонта M_1 , который прослеживается повсеместно. Этот период характеризовался значительным падением уровня моря, что привело к массивной эрозии шельфа и склонов, вследствие чего произошло региональное несогласие. Этап эрозии продолжается на протяжении большей части олигоцена [8].

Последующее миоценовое несогласие являлось еще более контрастным – оно было представлено в виде глубоких субпараллельных эрозионных каньонов, врезанных в континентальный склон на сотни метров. С точки зрения структурной геологии и литодинамического характера развития шельф окраины Кот-д'Ивуара является сравнительно узким с преобладанием шельфовой зоны шириной 30–40 км, что приводит к его быстрому покрытию дельтами и выносу грубозернистых осадков непосредственно на склон и подножие, а в некоторых случаях и в глубоководную часть бассейна.

В акватории Гвинейского залива имеют место как минимум три основные группы ловушек, перспективных на углеводороды: альбские структурные ловушки четырехстороннего

замыкания, маастрихтские стратиграфические ловушки в комплексе турбидитовых отложений и сантон-туронские глубоководные стратиграфические турбидитовые резервуары. В блоке RUS-CIV наиболее перспективными являются маастрихтские и туронские стратиграфические ловушки, похожие на гигантское месторождение Джубили в Гане, связанные с накоплением неоднородных турбидитовых отложений.

Турбидитовые коллекторы представляют собой потенциально выгодные в экономическом плане объекты для разведки углеводородов, и их изучение поможет в разведке огромных объемов нефти и газа в будущем, особенно для Западной Африки с учетом недавно открытых месторождений в Гане и Кот-д'Ивуаре. Лучшим способом описания каналов и русловых систем являются карты сейсмических атрибутов, поскольку их гораздо легче интерпретировать, чем стандартные сейсмические данные¹. Турбидитовые резервуары в рифтовых и пассивных окраинных установках атлантических осадочных бассейнов, расположенных в Кот-д'Ивуаре, представляют собой потенциальные экономические единицы для разведки углеводородов.

Понимание переноса осадков и условий осадконакопления имеет важное значение для эффективного управления резервуаром. Геоморфологические особенности, такие как каналы, подводные каньоны и различные типы намывов и врезов, имеют важное значение. Детальное изучение подобных структур турбидитовых каналов дает ценную информацию и помогает в определении целей разведки [9].

Для оценки свойств турбидитовых резервуаров использовались имеющиеся трехмерные сейсмические данные, а также соответствующие карты сейсмических атрибутов. Сейсмические атрибуты – это производные показатели из сейсмических данных, которые помогают охарактеризовать геологические особенности подземных пород и улучшить интерпретацию подземных структур [10]. Задачи атрибутного анализа делятся на структурные (наклоны, азимуты, нарушения сплошности) и вещественные (литология, фация, флюидонасыщенность). Объектами атрибутного анализа являются осадочные комплексы, пласти, сейсмоотражающие горизонты, залежи и коллекторы нефти и газа. Атрибутный анализ может быть как количественным, так и каче-



ственным. Начиная с 1970-х гг. сейсмические атрибуты прошли путь от нескольких простых измерений амплитуды, частоты и фазы вейвлета до обширного набора, способного измерять не только свойства вейвлета, но и их контекст в трехмерном сейсмическом объеме. Сейсмические атрибуты являются мощным инструментом интерпретации, который позволяет сегментировать данные и улучшать геологические модели [11].

Атрибуты являются лучшими инструментами для выделения интересующей сейсмической характеристики. Полученные из амплитуды, они используются для улучшения структурного изображения недр и предоставления более подробной информации о физических свойствах, таких как акустическая жесткость и скорость. Атрибуты фазы относятся к стратиграфии, раскрывая непрерывность в дополнение к конфигурациям отражателя. Атрибуты, полученные из частоты, достаточны для предоставления оценки резервуара, полезны в стратиграфических событиях, обнаружении разломов и в качестве прямых индикаторов углеводородов. Огибающая, как и интенсивность, отражают явления ярких пятен, что свидетельствует о наличии углеводородов [12]. Добавление 3D сейсмических данных имеет важное значение для преодоления неопределенностей в масштабах различных наборов данных в турбидитовых системах [13].

Доступный набор сейсмических данных представляет собой 3D сейсмический куб с временной миграцией до суммирования (PSTM, от англ.: Pre-Stack Time Migration), с последующей глубинной миграцией до суммирования (PSDM, от англ.: Pre-Stack Depth Migration), охватывающей основную территорию исследования. Основной целью повторной обработки являлось получение надежного сигнала о толще верхнего мела, позволяющего охарактеризовать русловые системы. Входными данными были амплитуды, а используемым программным обеспечением – пакет Kingdom SMT. Для того чтобы получить соответствующую геологическую и литологическую информацию при обнаружении русловых систем и стратиграфических ловушек в пределах блока RUS-CIV, использовались карты сейсмических атрибутов, полученные из набора сейсмических данных.

Стратиграфическая ловушка верхнего мела в турбидитных каналах является перспективным объектом. Крупный (2500 км^2)

глубоководный конус выступа был активным на участке изучаемой площади в верхнем меловом периоде, в результате чего осадочный разрез верхнего мела содержит большое количество канализированных турбидитных песчаных пластов. Каналы имеют разную ширину (100–200 м) и характеризуются различной степенью извилистости. Ожидается, что каналы содержат турбидитные песчаные пласти хорошего качества. Аналогичные комплексы извилистых заполненных каналов во всех других местах мира обычно имеют соотношение эффективных и общих толщин до 80 % включительно и обладают пористостью диапазоном 25–30 %. Перспективным объектом считается область, связанная с потенциальным скоплением каналов, которая достаточно четко оконтурена для того, чтобы проводить целенаправленное бурение. Затем стоит обратить внимание на литологический состав и свойства, чтобы обнаружить области вероятного скопления углеводородов. После обнаружения каналов определяются их литологический состав и свойства, чтобы обнаружить участки, где вероятнее всего находятся залежи углеводородов. Для этого анализа использовались различные сейсмические атрибуты, которые дали обнадеживающие результаты, касающиеся турбидитовых систем.

Результаты исследования и их обсуждение

Данное исследование по большей части было основано на статистических свойствах пластов и характеристик резервуаров в верхнемеловых турбидитовых каналах для понимания их пространственного расположения. Сейсмические атрибуты описывают определенные свойства и используются для выбора геологических событий, они должны иметь уникальное, полезное и существенное значение, чтобы была возможность настраивать их на поиск конкретной цели. Такими атрибутами являлись относительный акустический импеданс (ОАИ) и вторая производная его огибающей. Карта атрибута глинистого индикатора помогла оценить содержание глины в каналах. Карты атрибутов ОАИ и второй производной огибающей позволили выявить многие каналы и отобразить основные литологические особенности на карте. По глинистому индикатору каналы наблюдались частично.

Акустический импеданс (произведение интервальной скорости на плотность) является



одним из важнейших свойств горных пород, которые можно извлечь с помощью инверсии из традиционных данных сейсморазведки – карт отражающих горизонтов (рис. 3, а). ОАИ пласта лучше отображает каналы. Цветовая шкала также влияет на обнаружение каналов, что может привести к ошибкам. Другими словами, если использование атрибута не позволяет обнаруживать каналы сразу, это не означает, что их не существует. Прежде чем сделать подобный вывод, важно изменить цветовую шкалу. На этом уровне вероятность человеческой ошибки относительно высока, поэтому следует проявлять большую осторожность. Ошибки интерпретации также могут возникать из-за низкого качества полевых данных или их обработки, что может в той или иной степени маскировать или модифицировать цели¹ [14].

В коллекторе акустический импеданс обратно пропорционален пористости, поскольку

повышенная пористость снижает плотность породы и обычно снижает скорость продольных волн [15]. Если в поровом флюиде вода или нефть замещаются газом, плотность и скорость продольных волн резко снижаются. В результате скорость продольных волн и акустический импеданс служат прямыми индикаторами углеводородов [16].

На карте атрибута ОАИ (рис. 3, б) показан контраст кажущегося акустического импеданда в ограниченной полосе, что дает представление о пористости, поверхностях несогласия, неоднородностях и указывает на возможные высококонтрастные границы. ОАИ отображает видимый акустический контраст, несогласия и неоднородность, он связан с пористостью или содержанием жидкости. Вторая производная огибающей (рис. 3, с) позволяет измерить резкость пика и отображает все пики огибающей. По данной причине этот мгновенный атрибут очень хорошо помогает отразить недра и

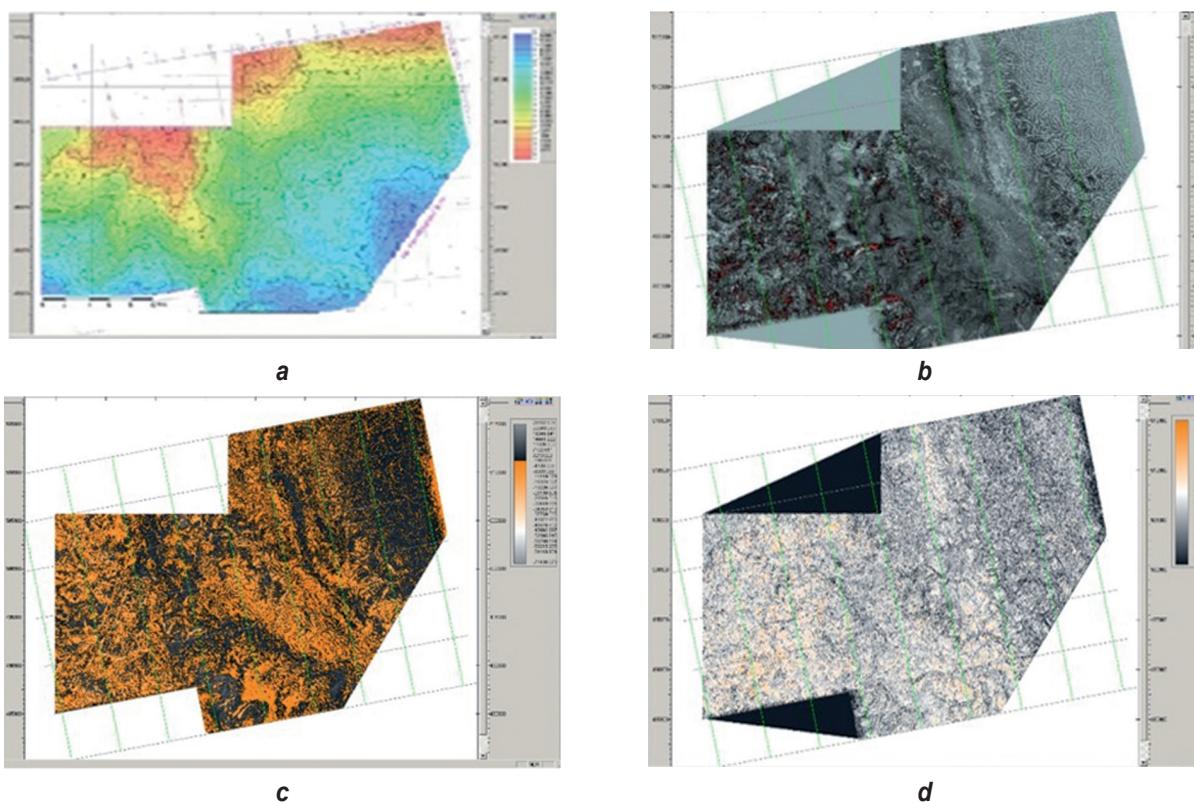


Рис. 3. Распределение атрибутов для систем каналов по горизонту M_1 :

а – карта изоглубин верхнемаастричского горизонта; б – относительный акустический импеданс;
с – вторая производная огибающей; д – глинистый индикатор

Fig. 3. Attribute distribution for channel systems along the M_1 horizon:

a – map of isodepths of the Upper Maastrichtian horizon; b – relative acoustic impedance;
c – second derivative of the envelope; d – shale indicator

¹ Achyuta A.M., Soumyajit M. Atlas of structural geological interpretation from seismic images. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2018. 48 p.



определить все границы отражения, обнаруживаемые в пределах сейсмической полосы пропускания. Вторая производная огибающей часто относится к литологии и условиям осадконакопления [17]. Глинистый индикатор отображает вариации распространения глинистых пород (рис. 3, d).

Использованные сейсмические атрибуты позволили выявить основные каналы. Детальное рассмотрение канализированной системы (рис. 4) позволило отметить некоторые ее особенности. В северо-восточном углу участка геологические события становятся более четкими, канализированная система лучше отображается и появляется третья ветвь. Для детального анализа истории формирования каналов и определения их перспективности исследуемая область была разделена на две зоны (см. рис. 4, a). Предполагалось, что первая зона старше второй, так как связь между ними отсутствует, поэтому можно считать, что обе зоны не были активны в один и тот же момент. Вероятно, в период активности первой

зоны вторая не существовала и появилась несколько позже (после консервации первой). Второе важное замечание – появление третьего канала (синий цвет), которого нет в волновом поле верхнего маастрихта. Это можно объяснить тем, что данный канал возник примерно на 100 мс глубже верхнего маастрихта.

Для оценки истории формирования каналов использовался атрибут объема, рассчитанный с помощью программы Calculator-VatMav, алгоритм которой подразумевает использование данных с сохранением амплитуд. Он реализуется путем расчета суммы квадратов амплитуд сигналов по сейсмотрассе в определенном окне с последующим отнесением суммарных значений к определенному промежуточному отражающему горизонту. Основной целью использования указанного атрибута являлось выявление интервала, в котором можно было получить геометрические характеристики каналов и оценить маршрут их формирования. Для достижения указанной цели был выбран интервал в 100 мс

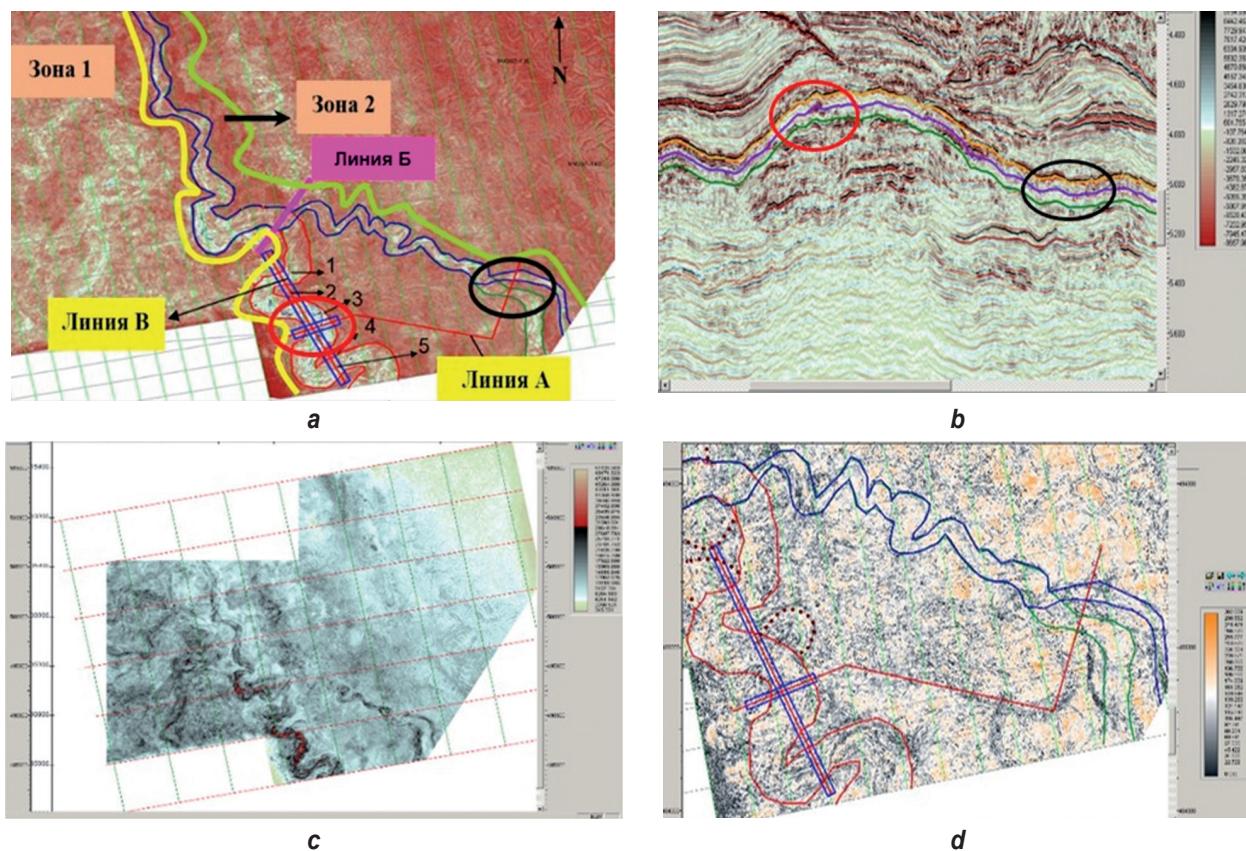


Рис. 4. Оценка истории формирования каналов с помощью интервального атрибута объема:
а – схема расположения интерпретационных профилей; б – временной разрез по линии А с целевыми горизонтами; в – карта относительного акустического импеданса; г – карта глинистого индикатора

Fig. 4. Evaluation of channel formation history using interval volume attribute
a – interpretation profile layout; b – time section along the line A with target horizons;
c – relative acoustic impedance map; d – shale indicator map



вниз от отражающего горизонта M_1 . Верхний маастрихт на рис. 4, *b* выделен желтым, интервал маастрихт+100 – зеленым цветом, между ними находится горизонт фиолетового цвета с рассчитанным атрибутом.

Исследование было сосредоточено на второй зоне. На рис. 4, *a*, видно, что канализированная система может быть разделена на три части, обозначенные разными цветами (синий, красный и зеленый). Перед линией Б все эти три цвета наложены друг на друга. Нижняя линия обозначена красным цветом, средняя – зеленым, а верхняя – синим.

Каждый канал (соответствующего цвета) основан на таких двух факторах, как размер (ширина) и состав отложений. Что касается первого фактора (см. рис. 4, *c*), он показывает, что размер каждой части меняется вместе с цветом. Например, средний размер красного канала составляет около 1150–1300 м, в то время как зеленый варьируется от 850 до 1100 м, синий же канал имеет значения, включающие интервал 450–500 м. Благодаря этому факту можно обнаружить связь между этими размерами и образованием каждого канала.

Для изучения содержания осадка использовался атрибут глинистого индикатора (см. рис. 4, *d*). Анализ указанного атрибута показывает, что каналы в основном песчаные. Это предположение подтверждается тем фактом, что чем серее цвет в канале, тем меньше этот канал должен содержать глины. Белый цвет представляет среднее значение глинистости, а чем больше оранжевого цвета, тем выше глинистость. Таким образом, по этому наблюдению среднее значение глинистости состав-

ляет около 75 % по сравнению с 25 % для песка, если рассматривать все каналы в целом.

Сравнение двух факторов позволяет подтвердить, что все каналы были активны в один и тот же период, при этом существовала система распределительного канала. Это означает, что есть главный канал (канал-ствол), который формируется путем суперпозиции трех цветов (красного, зеленого и синего) и их локализации перед линией Б (см. рис. 4, *a*) с продолжением в красном направлении, затем есть два ответвления, показанные синим и зеленым каналами. Разница в размерах между зеленым и синим каналами подтверждает тот факт, что зеленый старше синего. Описанные выше различные ответвления могли быть образованы многими капризами природы, такими как высокий градиент и скорость потока, а также характер изменения свойств и мощности отложений.

Фрагментирование временного разреза (красный и черный овалы на рис. 4, *b*) помогает понять внутреннюю структуру каналов в западной части линии А. Рассматривая два интервала временного разреза (рис. 5), можно заметить, что они представлены высокоамплитудными отражателями. Внутренняя часть каналов представлена положительной формой палеорельефа, а внешняя (намыв) – отрицательной.

Указанный тезис подтверждается данными, показанными на рис. 5, *b*, но, с другой стороны, на рис. 5, *a* продемонстрировано глобальное чередование положительной и отрицательной формы в той же внутренней части канала. В связи с этим наблюдением было

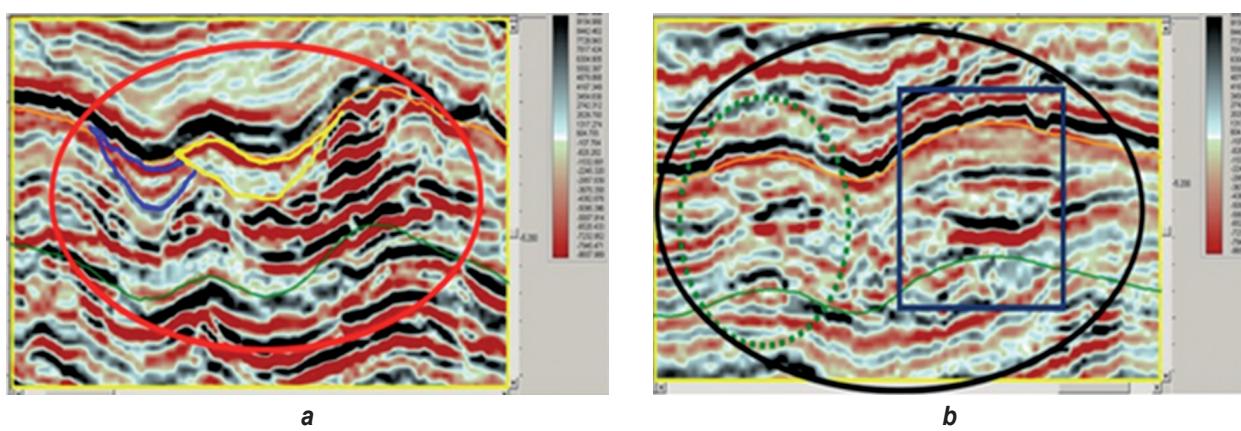


Рис. 5. Детализация строения турбидитовых каналов по профилю А:

a – фрагментированное изображение красного канала;

b – фрагментированное изображение зеленого и синего каналов

Fig. 5. Detailed structure of turbidite channels along the profile A:

a – fragmented image of the red channel;

b – fragmented image of the green and blue channels



уделено большое внимание явлению, которое могло создать этот факт. Для этого путем интерполяции была синтезирована произвольная линия *B*, которая пересекла линию *A* в интересующей нас области (см. рис. 4, *a*). По этой линии на временном сейсмическом разрезе *B* были выбраны 5 интервалов с различными формами палеорельефа (рис. 6).

Было замечено, что во внутренней части канала положительная и отрицательная формы представляют намыв. То же самое наблюдение было сделано в контурах прямоугольника 3, который характеризуется чередованием положительных и отрицательных форм палеорельефа. Важный аспект этого наблюдения заключается в том, что внутренняя часть каналов в основном представлена высокоамплитудным отражателем. Важно также отметить, что эта наблюдаемая часть (*B*) увеличивается на 10 км в длину и более чем на 1,4 км в ширину. С этим значением можно сказать, что рассматриваемый канал простирается на большое расстояние. Сбор наблюдений привел к выдвижению следующей гипотезы:

- высокоамплитудный отражатель и положительная форма в русле относятся к песку;
- отрицательная форма и низкая амплитуда на сейсмике соответствуют намывам и говорят о преобладании глин;
- чередование отрицательной и положительной формы в русле можно объяснить тем фактом, что в одной и той же долине находится более одного русла.

Например, экстраполяция главной реки может создать в долине несколько небольших ответвлений, которые можно назвать вторичными реками. Эта или вторичные реки могут быть причиной наблюдаемого чередования. На рис. 5, *a* сделана попытка продемонстрировать ситуацию в этом русле. Если внимательно посмотреть на сейсмические данные, можно увидеть первое русло (предположительно реку) синего цвета, через которое перекинута желтая река, и именно это объединение разных русел в одном большом могло создать наблюдаемое чередование.

Изучая взаимосвязь между показателем глинистости и ОАИ, можно получить представление о пористости песчаных тел. Совместный анализ рис. 4, *c, d* показывает преобладание песчаных тел по сравнению с глинистыми телами внутри каналов.

Чтобы проверить значимость глинистого индикатора и ОАИ для коллекторских свойств каналов, было тщательно проанализировано распределение ОАИ и глинистого индикатора по интересующим областям. Глинистый индикатор указывает на преобладание песчаных или глинисто-песчаных смешанных фаций на участках русла (см. рис. 4, *d*). Каналы верхнего мела демонстрируют в основном высокие значения ОАИ в частях меандров, тогда как остальные имеют значения от средних до высоких (см. рис. 4, *a*). Кросс-плот (см. рис. 5, *d*) подчеркивает взаимозависимость между глинистым индикатором и ОАИ. Фация высокой пористости в полигоне А с низким ОАИ покры-

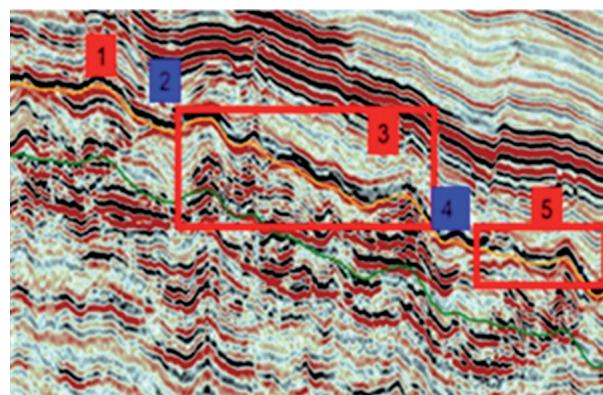
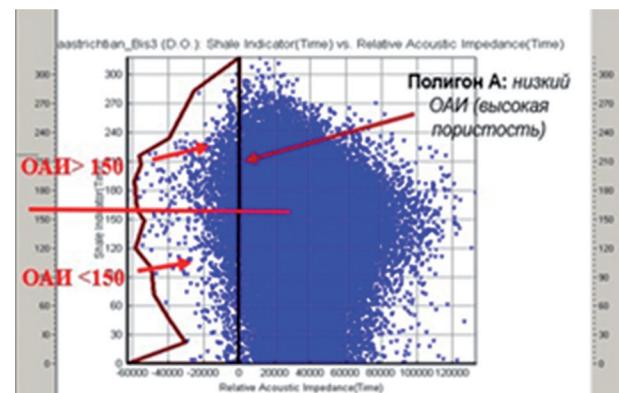
*a**b*

Рис. 6. Детализация интервала области пересечения линий А и В:
a – временной разрез по линии *B*;

b – кросс-плот: глинистый индикатор / относительный акустический импеданс
 1, 5 – положительная форма; 2, 4 – отрицательная форма; 3 – область пересечения линий А и В

Fig. 6. Detailed interval of lines A and B intersection
a – time section along the line *B*; *b* – scatter plot: shale indicator / relative acoustic impedance
 1, 5 – positive shape; 2, 4 – negative shape; 3 – intersection area of lines A and B



вает примерно 1/3 каналов, тогда как 2/3 имеют высокий ОАИ. На рис. 4, а заметны песчаные участки (коричневые части) при переходе от прямой формы русла к извилистой, а также на извилистых участках вдоль предполагаемого тальвега русла. Оба явления можно объяснить изменениями в энергетическом режиме: скоростью потока и его пропускной способностью [18] (более крупные зерна отлагались вблизи изменения наклона, что указывает на смену наклона вниз на меандры). Энергия и способность потока снизились, что привело к отложению песка. Более грубый материал также, вероятно, откладывается вблизи тальвега и подрезанного склона, тогда как мелкие осадочные частицы оставались в намывах. Общее перераспределение глины и низкий ОАИ показаны на полигоне А (см. рис. 5, д), где красной линией отмечено среднее значение глинистых пород, составляющее 150. Если значение глинистого индикатора выше 150, над песком преобладает глина. Если оно ниже 150, то наблюдается преобладание песка над глиной.

Полученные результаты и интерпретация нуждаются в дальнейшем подтверждении трехмерной диаграммой распределения территории и данными, полученными в результате каротажа и анализа керна [19]. Разработаны новые методы, которые могут помочь оптимизировать работу резервуаров (например, сравнение сейсмических и скважинных данных для количественного прогнозирования эффективных толщин коллекторов с использованием алгоритмов машинного обучения) [20]. Также можно применить новый метод обнаружения сейсмических геологических каналов для набора 3D сейсмических данных на основе многорассовой вариационной модовой декомпозиции. Благодаря применению указанного метода происходит разложение широкополосных сейсмических данных на несколько внутренних модовых функций, затем вычисляются сейсмические атрибуты из каждого компонента для

анализа геологических особенностей. Использование данного метода демонстрирует силу в изображении подробных краев и осадочных сигналов палеоканалов [21]. Кроме того, несмотря на качество коллектора, необходимо определить дополнительные параметры, чтобы сделать исследуемый район перспективным в отношении месторождений углеводородов. Такими параметрами являются НП, покрышка, ловушка, степень зрелости углеводородов и рентабельность (в зависимости от размера перспективного объекта).

Заключение

Проведенное исследование благодаря своей актуальности позволило показать эффективность анализа сейсмических атрибутов для оптимизации прогноза и описания характеристик залежей углеводородов. Благодаря использованию доступного набора сейсмических данных были локализованы русловые системы, а затем изучены их литологический состав и свойства, способствующие обнаружению областей вероятного скопления углеводородов. Наблюдение и интерпретация геологических событий на данном этапе изучения носят качественный характер. Основная идея распределения потенциальных коллекторов может быть выработана путем анализа кросс-плота, а области с хорошими коллекторскими свойствами могут быть предложены в качестве объекта бурения с целью уточнения количественных показателей.

Поэтому 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 реальное представление о приуроченности углеводородов. Например, настоятельно рекомендуется провести геофизические исследования скважин и анализ керна.

Список источников

1. 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>.
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. 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.
4. 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 р.

5. Antobre A.A., Faleide J.I., Tsikala F., Planke S. Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data // *Marine and Petroleum Geology*. 2009. Vol. 26. Iss. 3. P. 345–368. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.04.005>.
6. Burrell A., Polyaeva E., Sie G., Essoh S. Go west: deepwater prospectivity in the Côte d'Ivoire basin // *GEO ExPro*. 2022. Iss. 5. P. 34–36. Режим доступа: https://www.tgs.com/hubfs/Technical%20Library/Technical%20Library%20Files/geoexpro_burrell_et_al_sept_cdi.pdf (дата обращения: 30 января 2025).
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. № 12. P. 2051–2063.
9. Appiah M.K., Danuor S.K., Bedu-Addo S., Bienibuar A.K. Turbidite dynamics and hydrocarbon reservoir formation in the Tano Basin: a coastal West African perspective // *International Journal of Geosciences*. 2024. Vol. 15. Iss. 2. P. 137–161. <https://doi.org/10.4236/ijg.2024.152010>.
10. Roncoroni G., Forte E., Pipan M. Deep attributes: innovative LSTM-based seismic attributes // *Geophysical Journal International*. 2024. Vol. 237. Iss. 1. P. 378–388. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae053>.
11. Dewett D.T., Pigott J.D., Marfurt K.J. A review of seismic attribute taxonomies, discussion of their historical use, and the presentation of a seismic attribute communication framework using data analysis concepts // *Interpretation*. 2021. Vol. 9. Iss. 3. P. B39–B64. <https://doi.org/10.1190/int-2020-0222.1>.
12. Yousifa F.H., Aziza B.Q., Babana E.N. Oil reservoir detection using volume attributes in chiasurkh area, kurdistan region, Iraq // *Science Journal of the University of Zakho*. 2022. Vol. 10. Iss. 4. P. 163–168. <https://doi.org/10.25271/sjuz.2022.10.4.962>.
13. Bouma A.H., Normark W.R., Barnes N.E. COMFAN: Needs and initial results // *Submarine fans and related turbidite systems* / eds A.H. Bouma, W.R. Normark, N.E. Barnes. New York: Springer-Verlag, 1985. P. 7–11.
14. Surachman L.M., Abdulraheem A., Al-Shuhail A., Sanlinn I.K. Acoustic impedance prediction based on extended seismic attributes using multilayer perceptron, random forest, and extra tree regressor algorithms // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024. Vol. 14. Iss. 7. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01795-7>.
15. Bacon M., Simm R., Renshaw T. 3-D seismic interpretation. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 206 p.
16. Liner C.L. Elements of 3D seismology. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1999. 438 p.
17. Aguiar L.F., Freire A.F.M., Santos L.A., Dominguez A.C.F., Neves E.H.P., Silva C.G., et al. Analysis of seismic attributes to recognize bottom simulating reflectors in the Foz do Amazonas basin, Northern Brazil // 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (Rio de Janeiro, 19–22 August 2019). Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2019. <https://doi.org/10.22564/16cisbgf2019.039>.
18. Hjulstrøm F. Transportation of detritus by moving water // *Recent marine sediments* / ed. P.D. Trask. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1939. P. 5–31.
19. Sunday James A., Kenneth Olayinka O. Seismic attribute analysis and 3D model-based approach to reservoir characterization of "KO" field, Niger Delta // *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 4. P. 1–28. <http://doi.org/10.22050/ijogst.2020.232984.1550>.
20. Заключнов И.С., Путилов И.С., Селетков И.А. Разработка нового способа расширенного сопоставления сейсмических атрибутов и данных ГИС для прогноза коллекторов на Таныпском месторождении нефти // Геофизика. 2020. № 5. С. 13–19. EDN: BZLJBX.
21. Leng J., Yu Z., Wu C. Enhanced discrimination of seismic geological channels based on multi-trace variational mode decomposition // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 11. P. 5416. <https://doi.org/10.3390/app12115416>.

References

1. 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>.
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. 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.
4. 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.
5. Antobre A.A., Faleide J.I., Tsikala F., Planke S. Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data. *Marine and Petroleum Geology*. 2009;26(3):345–368. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.04.005>.
6. Burrell A., Polyaeva E., Sie G., Essoh S. Go west: deepwater prospectivity in the Côte d'Ivoire basin. *GEO ExPro*. 2022;5:34–36. Available from: https://www.tgs.com/hubfs/Technical%20Library/Technical%20Library%20Files/geoexpro_burrell_et_al_sept_cdi.pdf [Accessed 30th January 2025].
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. Appiah M.K., Danuor S.K., Bedu-Addo S., Bienibuar A.K. Turbidite dynamics and hydrocarbon reservoir formation in the Tano Basin: a coastal West African perspective. *International Journal of Geosciences*. 2024;15(2):137-161. <https://doi.org/10.4236/ijg.2024.152010>.
10. Roncoroni G., Forte E., Pipan M. Deep attributes: innovative LSTM-based seismic attributes. *Geophysical Journal International*. 2024;237(1):378-388. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae053>.
11. Dewett D.T., Pigott J.D., Marfurt K.J. A review of seismic attribute taxonomies, discussion of their historical use, and the presentation of a seismic attribute communication framework using data analysis concepts. *Interpretation*. 2021;9(3):B39-B64. <https://doi.org/10.1190/int-2020-0222.1>.
12. Yousifa F.H., Aziza B.Q., Babana E.N. Oil reservoir detection using volume attributes in chiasurkh area, kurdistan region, Iraq. *Science Journal of the University of Zakho*. 2022;10(4):163-168. <https://doi.org/10.25271/sjuz.2022.10.4.962>.
13. Bouma A.H., Normark W.R., Barnes N.E. COMFAN: Needs and initial results. In: Bouma A.H., Normark W.R., Barnes N.E. (eds). *Submarine fans and related turbidite systems*. New York: Springer-Verlag; 1985, p. 7-11.
14. Surachman L.M., Abdulraheem A., Al-Shuhail A., Sanlinn I.K. Acoustic impedance prediction based on extended seismic attributes using multilayer perceptron, random forest, and extra tree regressor algorithms. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024;14(7):1-9. <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01795-7>.
15. Bacon M., Simm R., Renshaw T. *3-D seismic interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003, 206 p.
16. Liner C.L. *Elements of 3D seismology*. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1999, 438 p.
17. Aguiar L.F., Freire A.F.M., Santos L.A., Dominguez A.C.F., Neves E.H.P., Silva C.G., et al. Analysis of seismic attributes to recognize bottom simulating reflectors in the Foz do Amazonas basin, Northern Brazil. In: *16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. 19–22 August 2019, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense; 2019. <https://doi.org/10.22564/16cisbgf2019.039>.
18. Hjulstrøm F. Transportation of detritus by moving water. In: Trask P.D. (ed.). *Recent marine sediments*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists; 1939, p. 5-31.
19. Sunday James A., Kenneth Olayinka O. Seismic attribute analysis and 3D model-based approach to reservoir characterization of "KO" field, Niger Delta. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*. 2020;9(4):1-28. <https://doi.org/10.22050/ijogst.2020.232984.1550>.
20. Zaklyuchnov I.S., Putilov I.S., Seletkov I.A. Development a new method of seismic attributes and well data comparison for quantitative prediction of reservoir (Tanjypskoe Oilfield). *Journal of Geophysics*. 2020;5:13-19. (In Russ.). EDN: BZLJBX.
21. Leng J., Yu Z., Wu C. Enhanced discrimination of seismic geological channels based on multi-trace variational mode decomposition. *Applied Sciences*. 2022;12(11):5416. <https://doi.org/10.3390/app12115416>.

Information about the authors / Информация об авторах



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, редактирование рукописи.

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

Alexander G. Dmitriev – conceptualization, methodology, formal analysis, writing – 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 05.02.2025; одобрена после рецензирования 14.02.2025; принятая к публикации 25.02.2025.

The article was submitted 05.02.2025; approved after reviewing 14.02.2025; accepted for publication 25.02.2025.



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

Научная статья

УДК 551.243.8:552.578.2+553.98(47)

EDN: QTLKIS

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-101-111



Перспективы нефтегазоносности и флюидодинамическая система Предпатомского прогиба

Л.А. Рапацкая^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Целью проведенного исследования являлась оценка перспектив нефтегазоносности Предпатомского прогиба и ведущей роли геофлюидодинамических процессов в формировании очагов генерации углеводородов. В процессе работы были использованы данные, полученные в результате буровых и геофизических работ, а также материалы исследований, опубликованные в открытой печати. Рифейские перикратонные прогибы Сибирской платформы многими исследователями признаются основными нефтегазогенерирующими структурами, в пределах которых шел и, вероятно, продолжает идти процесс генерации углеводородов с последующей миграцией в благоприятные тектонические структуры платформы. Динамическая генерирующая и концентрирующая углеводороды система является функцией геологического пространства и времени. Толщи рифейских отложений, характеризующиеся большой мощностью, широким распространением по площади платформы, разнообразием литологического состава, являются самыми древними нефтегазогенерирующими отложениями на планете. К отложениям рифея приурочен гигантский Куюмбинско-Юрубченско-Тохомский ареал нефтегазонакопления, являющийся уникальным объектом не только для Сибирской платформы, но и для всей планеты. Флюидодинамическая система рифей-венд-нижнекембрийских толщ Предпатомского прогиба обеспечивает формирование очагов генерации и механизма образования залежей углеводородов, что контролируется совокупностью факторов геологического развития прогиба, особенностями его тектонического строения, литологическим составом и большими мощностями отложений осадочного чехла.

Ключевые слова: Сибирская платформа, тектоника, Предпатомский прогиб, флюидодинамическая система, очаги генерации, миграция углеводородов

Для цитирования: Рапацкая Л.А. Перспективы нефтегазоносности и флюидодинамическая система Предпатомского прогиба // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 101–111. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-101-111>. EDN: QTLKIS.

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

Original article

PrePatom trough oil and gas potential and fluid dynamic system

Larisa A. Rapatskaya^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the conducted research was to assess the oil and gas potential of the PrePatom trough and the leading role of geofluid dynamic processes in the formation of hydrocarbon generation centers. The study used the data of drilling and geophysical works, as well as research materials published in the open press. Many researches recognise the Riphean pericratonic troughs of the Siberian Platform as the main oil and gas generating structures within which the process of hydrocarbon generation had taken place, and probably is still going on with subsequent migration of hydrocarbons into favorable tectonic structures of the platform. The dynamic system generating and concentrating hydrocarbons is a function of geological space and time. The Riphean sediment strata characterized by great thickness, wide distribution over the platform area and diversity of lithological composition are the most ancient oil and gas generating sediments on the planet. The giant Kuyumba-Yurubchen-Tokhom oil and gas accumulation area is confined to the Riphean sediments. It is a unique object not only for the Siberian platform but also for the entire planet. The fluid dynamic system of the Riphean-Vendian-Lower Cambrian strata of the PrePatom trough ensures the formation of hydrocarbon generation centers and formation mechanism of hydro-



carbon deposits, which is controlled by a combination of factors of geological development of the trough, its tectonic structure features, lithological composition, as well as large thicknesses of sedimentary cover deposits.

Keywords: Siberian platform, tectonics, PrePatom trough, fluid dynamic system, generation centers, hydrocarbon migration

For citation: Rapatskaya L.A. PrePatom trough oil and gas potential and fluid dynamic system. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):101-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-101-111>. EDN: QTLKIS.

Введение

Рифейские перикратонные прогибы Сибирской платформы считаются такими исследователями, как А.А. Трофимук, А.Э. Конторович, А.И. Ларичев, В.С. Старосельцев, Ю.А. Филиппцов, В.В. Харахинов, С.И. Шленкин и др., основными нефтегазогенерирующими структурами, в пределах которых проходил и, возможно, продолжается процесс генерации углеводородов с последующей миграцией в нефтегазоносные области, зоны нефтегазонакопления, где в условиях, благоприятных для

локализации залежей нефти и газа, происходило и происходит образование месторождений (местоскоплений) углеводородов в разном фазовом состоянии [1, 2]. Предпатомский перикратонный прогиб является одной из тектонических структур Сибирской платформы, перспективной для поисков месторождений углеводородов в рифейских толщах (рис. 1).

Следует отметить, что рифейские толщи, характеризующиеся широким распространением на площади Сибирской платформы, являются самыми древними нефтегазогенерирующими

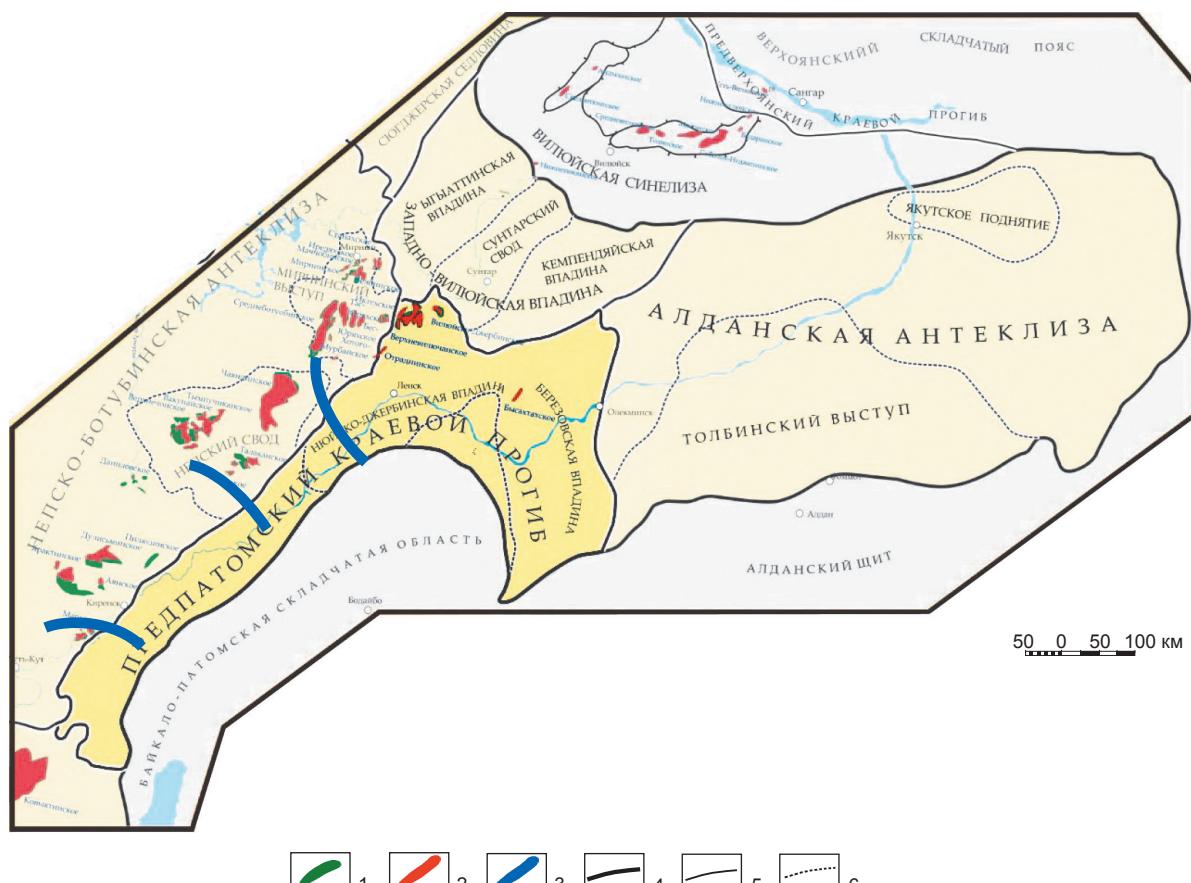


Рис. 1. Положение Предпатомского прогиба на тектонической карте (согласно источнику [3] с изменениями автора):

1 – месторождения нефти; 2 – месторождения газа и газоконденсата; 3 – пути миграции углеводородов;
4 – граница нефтегазоносного бассейна; 5 – граница нефтегазоносной области;
6 – границы внутренних тектонических элементов

Fig. 1. Position of the PrePatom trough on the tectonic map (according to the source [3] with the author's alterations):

1 – oil fields; 2 – gas and gas condensate fields; 3 – hydrocarbon migration routes;
4 – oil and gas basin boundary; 5 – oil and gas region boundary;
6 – boundaries of internal tectonic elements



образованиям. Именно к отложениям рифея приурочен гигантский Куюбинско-Юрубченско-Тохомский ареал нефтегазонакопления, являющийся уникальным объектом как для Сибирской платформы, так и для всей планеты [4, 5].

Материалы и методы исследования

Представление об углеводородных системах появилось в США в конце XX в. Под термином «углеводородная система» понимается совокупность пространственно-временных геологических и геохимических факторов, обуславливающих возможность генерации, миграции и аккумуляции углеводородов. Согласно этому определению динамическая генерирующая и концентрирующая углеводороды система является функцией геологического пространства и времени. В России углеводородные системы позиционируются как флюидодинамические [6].

Флюидодинамическая система рифей-венд-нижнекембрийских толщ (Предпатомский перикратонный прогиб) служит областью формирования очагов генерации и механизма образования скоплений углеводородов, что, в свою очередь, контролируется совокупностью факторов геологического развития прогиба, особенностями его тектонического строения, разнообразием литологического состава и большими мощностями выполняющих его отложений.

Известно, что одной из основных причин, осложняющей достоверность прогноза открытия месторождений нефти и газа, является разрыв между местом образования углеводородов и местом их нахождения (местоскопления). Флюидодинамические системы, возможно, послужат тем недостающим звеном, которое позволит соединить в единое целое место генерации углеводородов и место их аккумуляции.

Исследователи Б.А. Соколов и Э.А. Аблядают следующее определение флюидодинамической системы по отношению к углеводородам: «углеводородные растворы, генерируемые очагами генерации нефти и газа, являются примером банальной дефлюидизации нефтегазоматеринских пород осадочного бассейна – ординарной флюидодинамической системой» [7]. Исходя из этого тезиса, в основу концепции флюидодинамической системы нефтегазообразования закономерно было положено представление о единстве следующей триады [5]: очаг генерации → место образования

флюидов; пути миграции → каналы движения флюидов; зоны аккумуляции → местоскопления флюидов ⇒ флюидодинамическая система.

В вещественном физико-химическом выражении эту триаду можно представить как нефтегазоносный комплекс, включающий в себя такие объекты, как:

- 1) местоскопление → резервуар;
- 2) резервуар → ловушка;
- 3) ловушка → коллектор, флюидоупор.

В вещественном выражении флюидодинамическая система, как и любая другая, является объектом крайне нестабильным, способным изменяться во времени и пространстве, но который имеет свое достаточно равновесное вещественное выражение в виде разновозрастных нефтегазоносных комплексов с разнообразным литологическим составом [5].

Ко всем перикратонным прогибам Сибирской платформы приурочены региональные нефтегазоносные комплексы разного возраста, вещественное выражение которых отражается в литолого-стратиграфических разрезах месторождений нефти и газа разных масштабов и фазового состояния [8, 5]. Наиболее крупные месторождения углеводородов, связанные с рифейскими, рифей-вендскими и венд-кембрийскими нефтегазоносными комплексами на Сибирской платформе, в основном приурочены к склонам антеклиз древнего заложения – Непско-Ботубинской и Байкитской, обращенных в сторону сопряженных одновозрастных прогибов. В этих структурах проходило интенсивное накопление мощных осадочных толщ с обильной органикой, которые в течение последующих тектонических и седиментологических процессов преобразовались в очаги нефтегазогенерации. По классификации платформенных структур структуры обрамления Сибирской платформы правильнее называть перикратонными опусканиями (перикратонными прогибами)¹.

Особого внимания в отношении перспектив нефтегазоносности рифея заслуживает Предпатомский перикратонный прогиб, где отмечается большая мощность рифейских нефтегазоносных толщ, а многие исследователи считают его палеоочагом генерации углеводородов. Прогиб выполнен мощной толщей терригенно-карбонатных рифей-венд-нижнекембрийских отложений, с которыми связаны основные перспективы нефтегазоносности (рис. 2).

¹ Решения совещания по классификации платформенных структур. Л.: Изд-во ВНИГРИ, 1963. 16 с.

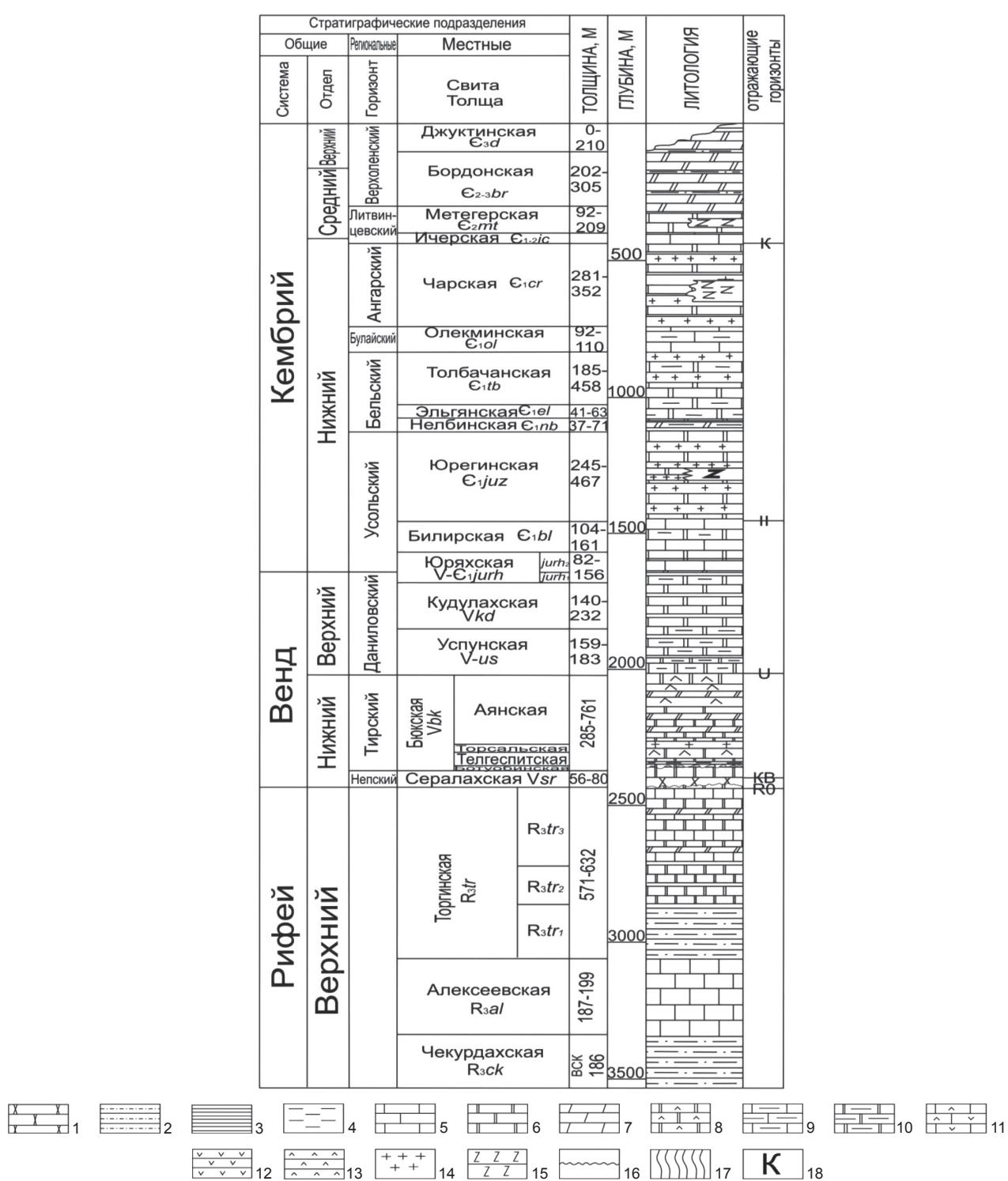


Рис. 2. Сводный литолого-стратиграфический разрез Предпатомского прогиба [9]²:

1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – аргиллиты; 4 – глины; 5 – известняки; 6 – доломиты; 7 – мергели;
8 – доломиты ангидритизированные; 9 – известняки глинистые; 10 – глинистые доломиты;
11 – известняки гипсоносные и ангидритовые; 12 – гипсы; 13 – ангидриты; 14 – каменные соли;

15 – траппы диабазов; 16 – размывы; 17 – фундамент; 18 – отражающие горизонты

Fig. 2. Combined lithological and stratigraphic section of the PrePatom trough [9]:

1 – sandstones; 2 – siltstones; 3 – argillites; 4 – clays; 5 – limestones; 6 – dolomites; 7 – marls;

8 – anhydritized dolomites; 9 – clayed limestones; 10 – clayed dolomites;

11 – gypsum-bearing and anhydrite limestones; 12 – gypsums; 13 – anhydrites; 14 – rock salts;

15 – diabase traps; 16 – erosions; 17 – basement; 18 – reflecting horizons

² По данным ПГО «Ленанефтегазгеология», 1987.



Благодаря проведенной рядом исследователей работе, возникло основание предполагать, что в Предпатомском перикратонном прогибе с доказанной и перспективной нефтегазоносностью существует собственная флюидодинамическая система, которая по ряду признаков еще не полностью реализовала свой нефтегазоматеринский потенциал, поэтому генерация углеводородов продолжается в настоящее время.

А.В. Мигурским с соавтором была разработана модель покровно-надвигового строения Предпатомского перикратонного прогиба, смежных частей Непско-Ботуобинской антеклизы и Ангаро-Ленской ступени с масштабным (на десятки километров) перемещением сорванных покровов [10]. Вертикальные и горизонтальные перемещения блоков земной коры способствуют возникновению неравновесных флюидодинамических систем, стремящихся, как и любая природная система, к равновесию и упорядоченности [11, 12]. Поэтому складчато-надвиговые процессы в прогибе сопровождались интенсификацией латеральной миграцией флюидов, в том числе и углеводородов, со стороны складчатых областей внутрь Сибирской платформы [13].

Тектонические структуры с одноименными нефтегазоносными областями, как правило, территориально сопряжены с перикратонными прогибами, к которым приурочены очаги нефтегазогенерации. Так, Байкитская нефтегазоносная область на территории Байкитской антеклизы граничит с запада с Енисейским палеоочагом (современный Енисейский кряж), а Непско-Ботуобинская нефтегазоносная область на территории Непско-Ботуобинской антеклизы с востока и юго-востока граничит с Предпатомским палеоочагом (современный Предпатомский прогиб).

В палеоплане главный очаг нефтегазоносности располагался на территории современного Байкало-Патомского нагорья, где в отложениях рифея и венда широко распространены черносланцевые формации, обладающие высоким потенциалом генерации углеводородов.

Более четырех десятилетий назад в Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции А.Н. Золотов назвал главными очагами генерации углеводородов Сибирской платформы Приенисейскую и Прибайкальско-Патомскую зоны перикратонных опусканий (в современной терминологии – перикратонные прогибы) с мощными толщами рифейских и вендских

отложений, богатыми органическими веществами и обладающими большим нефтегазогенерационным потенциалом, который реализовался на больших глубинах и в жестких термодинамических условиях [14].

В вышеизложенных положениях приводятся доказательства о существовании и продолжении деятельности очага генерации углеводородов в Предпатомском перикратонном прогибе.

На юго-восточной окраине Сибирского края в Предпатомском перикратонном прогибе существует крупный Предпатомский палеоочаг нефтегазообразования, связанный с Прибайкальско-Патомской зоной перикратонных опусканий, где распространены мощные нефтегазогенерирующие черносланцевые толщи рифейского возраста, а интенсивность эмиграции битумоидов достигала 3000–5000 тыс. т/км² [15].

Предпатомский прогиб, расположенный на границе Сибирской платформы и Байкало-Патомской складчатой области, сформировался в период коллизионного орогенеза последней с древним Сибирским кратоном. Прогиб характеризуется сложным тектоническим строением – его главной отличительной чертой является широкое развитие надвиговых деформаций, разделяющих разрез на автохтонную и аллохтонную части [16]. В северо-восточной части выделяются Нюйско-Джербинская и Березовская впадины, разделенные Джекутинским выступом [17] (см. рис. 1).

По нефтегазогеологическому районированию прогиб относится к Предпатомской нефтегазоносной области Лено-Тунгусского нефтегазоносного бассейна. Перспективным объектом в зоне генерации нефти и формирования ловушек являются отложения прогиба в восточной и северо-восточной частях Иркутской области [5]. Основные перспективы на территории прогиба, как правило, связывают с Бысахтахским продуктивным горизонтом сералахской свиты венда. Промышленные притоки газа из этого горизонта получены на Бысахтахском газоконденсатном месторождении и газоконденсатном месторождении им. И.Н. Кульбертинова [16].

Согласно исследованиям А.Э. Конторовича с соавторами и др., основным источником углеводородов рифея – нижнего кембрия Сибирской платформы были рифейские очаги нафтидообразования [1, 18]. Перспективность продолжения изучения Предпатомского перикратонного прогиба диктуется его доказанной нефтегазоносностью – уже открытymi место-



рождениями нефти и газа, большой мощностью рифей-вендинских нефтегазоносных комплексов, входящих в состав его осадочного чехла. По многим показателям нефтегазоносные комплексы прогиба являются высокоперспективными объектами для поисков и разведки углеводородного сырья, а по мнению некоторых исследователей, имеют не до конца реализованный генерационный нефтегазовый потенциал [9]. Также немаловажным фактором служит пространственное расположение прогиба вблизи современной транспортной и добывающей нефтегазовой инфраструктуры.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенное исследование показало, что Предпатомский перикратонный прогиб, обрамляющий с запада, севера и востока Байкало-Патомское нагорье, служит основной областью питания – палеоочагом генерации углеводородов для месторождений Непско-Ботубинской антеклизы, и, кроме того, является частью транзитной территории, через которую осуществлялась миграция углеводородов из Байкало-Патомского палеобассейна [17].

Березовская впадина Предпатомского перикратонного прогиба расположена на периферии Сибирской платформы, в зоне ее сочленения с Байкало-Патомским складчато-надвиговым поясом. Осадочный чехол впадины сложен мощной толщей терригенно-карbonатных отложений рифея, венда и кембрия, в которых на различных стратиграфических уровнях отмечается присутствие магматических пород трапповой формации, предположительно, среднепалеозойского возраста [10, 17].

Перспективными участками на местоскопления нефти и газа в Березовской впадине являются возможные зоны повышенной трещиноватости, приуроченные к ее прибрежным частям, а также к восточной зоне, где впадина граничит с Предпатомским перикратонным прогибом. На территории впадины, входящей в Предпатомскую нефтегазоносную область, где уже были открыты три газоконденсатных месторождения: Отраднинское, Хотого-Мурбайское и Бысахтахское, есть все условия для генерации углеводородов: более 30 положительных локальных структур, на которых отмечены нефтегазопроявления, широкое площадное распространение надежных флюидоупоров, сложенных каменной солью, трещинные коллекторы в рифей-вендинских толщах (рис. 3).

Бысахтахское месторождение находится в пределах типичного горста размерами $50 \times (3-5)$ км, вытянутого в северо-восточном направлении и ограниченного с северо-запада и юго-востока Западно-Бысахтахским и Восточно-Бысахтахским сбросами [19]. Площадь Бысахтахской структуры по изогипсе составляет 3300 м и достигает 200 км², ее размеры: $50 \times (3-5)$ км. Амплитуда складки в пределах контура достигает 800 м. В поперечном разрезе структура практически симметрична. Литолого-стратиграфический разрез месторождения сложен в основном карбонатно-терригенно-галогенными отложениями кембрия-венда и карбонатными отложениями рифея (рис. 4).

На месторождении установлено два продуктивных комплекса: венд-нижнекембрейский карбонатный, покрышкой для которого являются соли юрегинской свиты верхнего – нижнего кембрия и рифей-нижневендинский терригенно-карбонатный, перекрытый пластами солей торсальской свиты венда. Наиболее изученными являются венд-нижнекембрейский комплекс и верхняя часть рифей-вендинского комплекса (бысахтахский горизонт сералахской свиты), в котором были выявлены залежи газа. Интервал газоносности составляет около 1000 м. На месторождении открыто четыре залежи (пластовые сводовые, тектонически ограниченные) (рис. 5) [20].

Сералахская свита в нижней части сложена песчаными алевритами, перекрытыми однородной пачкой аргиллитов от темно-серого до черного цветов с включениями пирита. Мощность пачки составляет 10–40 м. Среднее содержание С орг составляет 0,89 %, максимальное – 3,75–4 %.

Выполненные в разные годы геохимические исследования (И.Е. Москвитин и др., 1982; Т.К. Баженова и др., 2011; М.В. Дахнова и др., 2010, 2014; И.А. Иванова, 2015) дали основание для выделения сералахской свиты в качестве основной нефтегазоматеринской толщи нижнего венда Предпатомского перикратонного прогиба. Сералахской свите служит основной углеводородной нефтегазогенерирующей системой Березовской впадины Предпатомского перикратонного прогиба. Геохимическое изучение глинистых и карбонатных пород сералахской свиты показало, что ее отложения имеют повышенные концентрации сапропелевого органического вещества. По данным, представленным Н.П. Фадеевой [3], наиболее высокие остаточные концентрации органиче-

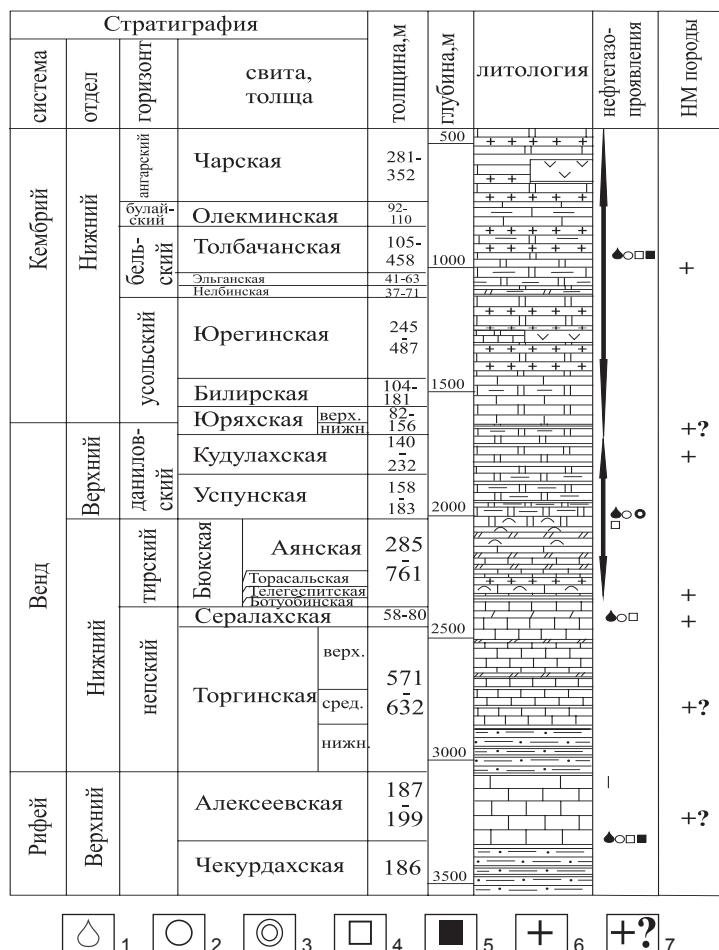


Рис. 3. Нефтегазопроявления в рифей-нижнекембрийском разрезе Березовской впадины [3]:

1 – нефть; 2 – газ; 3 – газоконденсат; 4 – мальты; 5 – асфальты;

6, 7 – нефтегазоматеринские породы: 6 – установленные, 7 – предполагаемые

Fig. 3. Oil and gas occurrences in the Riphean-Lower Cambrian section of the Berezovskaya Depression [3]:

1 – oil; 2 – gas; 3 – gas condensate; 4 – malts; 5 – asphalts;

6, 7 – oil and gas source rocks: 6 – discovered, 7 – inferred

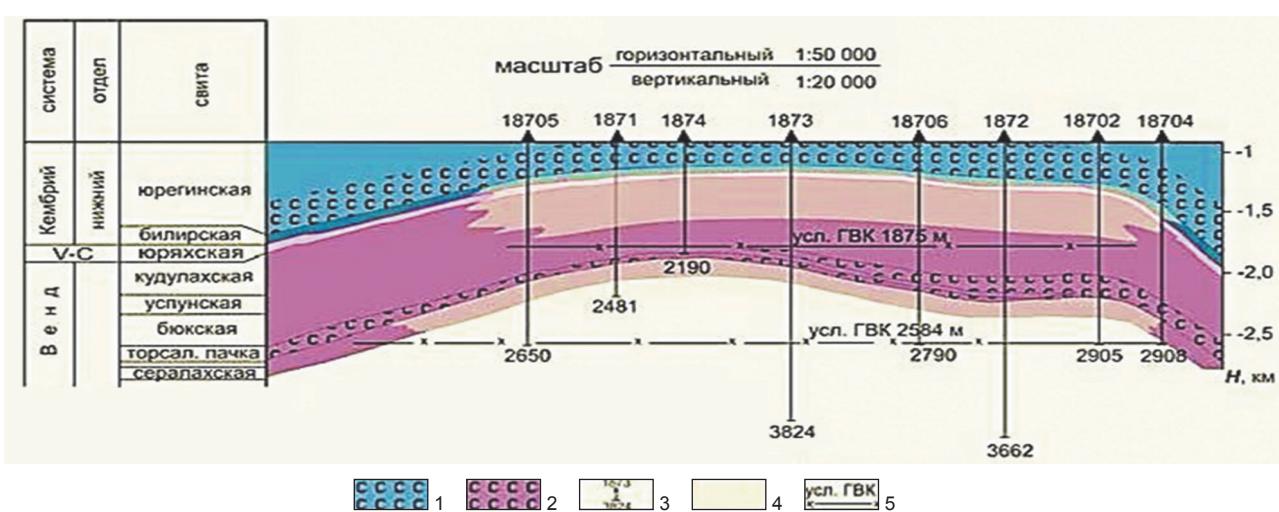


Рис. 4. Разрез продуктивных горизонтов Бысахтахского газоконденсатного месторождения [19]:

1 – соленоносные отложения юрегинской свиты; 2 – соленоносные отложения бюкской свиты; 3 – номер скважины

и глубина забоя, м; 4 – газоконденсатные залежи; 5 – условная глубина газоводяного контакта

Fig. 4. Section of Bysakhtakh gas condensate field productive horizons [19]:

1 – salt-bearing deposits of the Yuregin suite; 2 – salt-bearing deposits of the Byuk suite; 3 – well number

and bottomhole depth, m; 4 – gas condensate deposits; 5 – conventional depth of gas-water contact

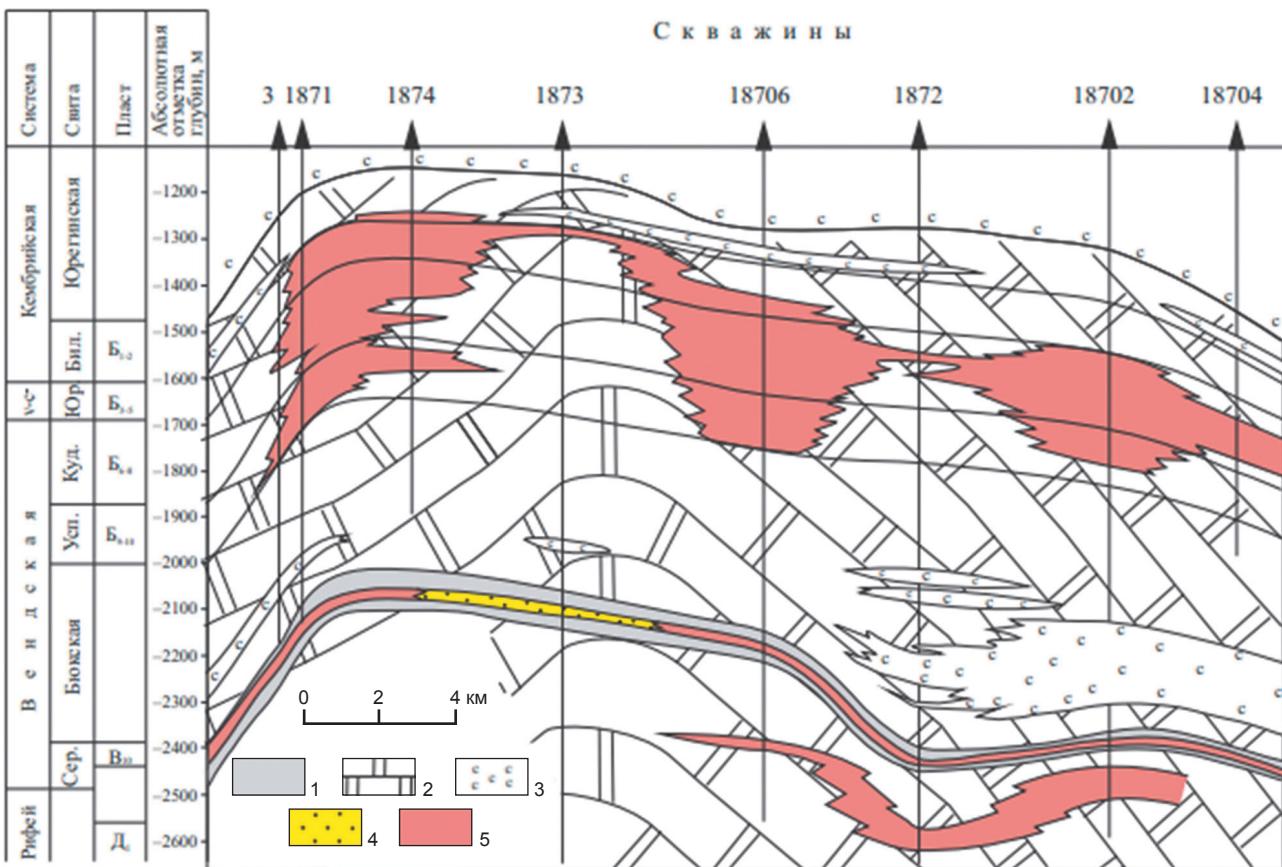


Рис. 5. Геологический профиль Бысахтахского месторождения [21]:

1–4: породы: 1 – глины (аргиллиты); 2 – доломиты и известняки; 3 – каменная соль; 4 – песчаники;
5 – газовое насыщение коллекторов

Свиты: Бил. – билирская; Юр. – юряхская; Куд. – кудалахская; Усп. – успунская; Сер. – сералахская

Fig. 5. Geological profile of the Bysakhtakh deposit [21]:

1–4: rocks: 1 – clays (argillites); 2 – dolomites and limestones; 3 – rock salt; 4 – sandstones;
5 – gas saturation of reservoirs

Suites: Бил. – Bilirskaya; Юр. – Yuryakhskaya; Куд. – Kudalahtskaya; Усп. – Uspunskaya; Сер. – Seralakhskaya

ского вещества (1,05–4,35/2,11) отмечены в образцах керна сералахской свиты венда Бысахатского месторождения и обладают самым высоким остаточным нефтегазоматеринским потенциалом. Катагенетическое преобразование сапропелевого органического вещества глинистой пачки сералахской свиты отвечает градациям катагенеза МК₃-МК₄, а в районах Байкало-Патомской складчатой области – до МК₅ и еще не утратило свой газогенерационный потенциал. Кроме того, выявлены многочисленные проявления нафтидов не только в породах сералахской свиты, но и в перекрывающих и подстилающих ее отложениях [9].

Заключение

По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Основным источником нефтегазогенерации нефти и газа для местоскоплений юга

Сибирской платформы служили древние рифейские очаги нафтидообразования.

2. Складчато-надвиговые процессы в тектонических структурах на юге Сибирской платформы сопровождались интенсификацией латеральной миграции углеводородных флюидов со стороны складчатых областей внутрь платформы.

3. Сералахская свита венда служит основной углеводородной нефтегазогенерирующей системой Березовской впадины Предпатомского перикратонного прогиба. Флюидодинамическая система сералахской свиты рифей-венд-нижнекембрийских толщ Предпатомского перикратонного прогиба обусловливала формирование очагов генерации и механизм образования залежей углеводородов.

4. Геохимическое изучение глинистых и карбонатных пород сералахской свиты Бысахатского месторождения, содержащих повышенные



концентрации сапропелевого органического вещества установило, что они обладают самым высоким остаточным нефтегазоматеринским потенциалом. Катагенетическое преобразование сапропелевого органического вещества глинистой пачки сералахской свиты отвечает градациям катагенеза МК₃-МК₄, а в районах Байкало-Патомской складчатой области – до МК₅ и еще не утратило свой газогенерационный потенциал.

Есть основание предполагать, что отложения сералахской свиты, служащей основной нефтегенерирующей системой Предпатомского перикратонного прогиба, еще не до конца реализовали свой нефтегазогенерационный потенциал. Они способны пополнять запасы уже открытых месторождений и, возможно, формировать новые местоскопления нефти и газа.

Список источников

1. Конторович А.Э., Изосимова А.Н., Конторович А.А. Геологическое строение и условия формирования гигантской Юрубченко-Тохомской зоны нефтегазонакопления в верхнем протерозое Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 8. С. 166–195.
2. Харахинов В.В., Шленкин С.И., Зеренинов В.А. Рябченко В.Н., Зощенко Н.А. Нефтегазоносность докембрийских толщ Куюбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазонакопления // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 1. С. 8. EDN: OYQFFF.
3. Фадеева Н.П., Морозов Н.В., Бакай Е.А., Фролов С.В. Геохимические предпосылки нефтегазоносности Березовской впадины (Восточная Сибирь) // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 2. С. 44–55. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.4>. EDN: DMQNZN.
4. Рапацкая Л.А. Нефтегазоносность рифей Сибирской платформы // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 3. С. 9–19. EDN: ZQZYZT.
5. Рапацкая Л.А. Нефтегазоносные комплексы – вещественное выражение геофлюидодинамических систем // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 345–366. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-345-366>. EDN: ZFFXPY.
6. Magoon L.B., Dow W.G. The petroleum system – from source to trap. Richardson: American Association of Petroleum Engineers, 2012. 644 р.
7. Соколов Б.А., Абля Э.А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования. М.: ГЕОС, 1999. 76 с.
8. Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Соловьева Л.В. Палеогеографические и палеогеодинамические условия формирования рифей-вендинского осадочного бассейна юга Сибирской платформы в связи с его нефтегазоносностью // Геология нефти и газа. 2008. № 1. С. 8–15. EDN: JXLXZX.
9. Иванова И.А. Геохимия органического вещества отложений Березовской впадины (Сибирская платформа) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 1. № 3. С. 4. https://doi.org/10.17353/2070-5379/27_2015. EDN: UKTIKH.
10. Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Зоны разломов – естественные насосы природных флюидов // Отечественная геология. 2000. № 1. С. 56–59.
11. Абля Э.А. Флюидодинамическая концепция нефтегазообразования. Начала (в порядке дискуссии) // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 2. С. 24–28. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.5>. EDN: KUWGRH.
12. Жарков А.М., Ануприенко А.А. Влияние блоковых перемещений фундамента на строение и нефтегазоносность базальных отложений осадочного чехла // Блоковое строение земной коры и нефтегазоносность: докл. Междунар. конф. СПб.: Изд-во ВНИГРИ, 1994. С. 73–76.
13. Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Шарьянское строение зоны сочленения Сибирской платформы с Байкало-Патомским нагорьем // Советская геология. 1989. № 7. С. 9–15.
14. Золотов А.Н. Тектоника и нефтегазоносность древних толщ. М.: Недра, 1982. 240 с.
15. Соболев П.Н., Шиганова О.В., Дыхан С.В. Перспективы увеличения нефтегазового потенциала докембрийских отложений Лено-Тунгусской провинции // Геология нефти и газа. 2009. № 6. С. 62–71. EDN: KYDZEX.
16. Сивцов А.И., Тимофеев Н.Г., Мещеряков В.А. Перспективные нефтегазовые объекты на северо-востоке Предпатомского прогиба // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29. № 2. С. 193–203. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-193-203>. EDN: BCBVZQ.
17. Мигурский А.В. Проблемы оценки масштабов и перспектив нефтегазоносности Предпатомской нефтегазоносной области в свете эволюции взглядов на тектоническое строение юго-восточного обрамления Сибирской платформы // Геология нефти и газа. 2019. № 2. С. 39–54. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-2-39-54>. EDN: KPMWMP.
18. Тимошина И.Д. Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефлей верхнего докембра юга Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. 166 с.
19. Сафонов А.Ф. Перспективы наращивания сырьевой базы нефтегазодобычи на территории РС(Я) // Наука и техника в Якутии. 2009. № 2. С. 15–21. EDN: MDRXRL.
20. Вотяков Р.В. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Березовской впадины (восточная часть Предпатомской нефтегазоносной области) // Геология нефти и газа. 2013. № 2. С. 15–20. EDN: PYDVIN.
21. Шемин Г.Г. [и др.]. Перспективы нефтегазоносности региональных резервуаров Предпатомского регионального прогиба (Сибирская платформа): монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 315 с.



References

1. Kontorovich A.Eh., Izosimova A.N., Kontorovich A.A. Geological structure and formation conditions of the giant Yurubcheno-Tokhomsky oil and gas accumulation area in the Upper Proterozoic of the Siberian platform. *Geologiya i geofizika*. 1996;37(8):166-195. (In Russ.).
2. Kharakhin V.V., Shlenkin S.I., Zereninov V.A., Ryabchenko V.N., Zoschenko N.A. Petroleum potential of Precambrian strata of Kuyumbinsko-Yurubcheno-Tokhomsky oil and gas accumulation area. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2011;6(1):8. (In Russ.). EDN: OYQFFF.
3. Fadeeva N.P., Morozov N.V., Bakay E.A., Frolov S.V. Geochemical background of Berezovsky depression oil and gas potential (Eastern Siberia). *Georesursy*. 2021;23(2):44-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.4>. EDN: DMQNZN.
4. Rapatskaya L.A. Oil and gas content of the Siberian platform Riphean deposits. *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*. 2017;40(3):9-19. (In Russ.). EDN: ZQZYZT.
5. Rapatskaya L.A. Oil and gas complexes as a material expression of geofluid dynamic systems. *Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):345-366. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-345-366>. EDN: ZFFXPY.
6. Magoon L.B., Dow W.G. *The petroleum system – from source to trap*. Richardson: American Association of Petroleum Engineers; 2012, 644 p.
7. Sokolov B.A., Ablya Eh.A. *Fluid dynamic model of oil and gas formation*. Moscow: GEOS; 1999, 76 p. (In Russ.).
8. Postnikova O.V., Fomicheva L.N., Solovieva L.V. Paleogeographic and paleogeodynamic formation conditions of Riphean-Vendian sedimentary basin in the south of Siberian platform regarding its oil and gas presence. *Russian Oil and Gas Geology*. 2008;1:8-15. (In Russ.). EDN: JXLZX.
9. Ivanova I.A. Geochemistry of organic matter from deposits of Bereza depression (Siberian platform). *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2015;1(3):4. (In Russ.). https://doi.org/10.17353/2070-5379/27_2015. EDN: UKTIKH.
10. Migurskii A.V., Starosel'tsev V.S. Fault zones as natural fluid pumps. *Otechestvennaya Geologiya*. 2000;1:56-59. (In Russ.).
11. Ablya E.A. Fluid-dynamic concept of oil and gas generation. Principles (discussion). *Georesursy*. 2022;24(2):24-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.5>. EDN: KUWGHR.
12. Zharkov A.M., Anuprienko A.A. Influence of basement block movements on structure and oil and gas content of sedimentary cover basal deposits. In: *Blokovoe stroenie zemnoi kory i neftegazonosnosti': doklady Mezhdunarodnoi konferentsii = Block structure of the earth's crust and oil and gas content: proceedings of the International conference*. Saint Petersburg: All-Russia Petroleum Research Exploration Institute; 1994, p. 73-76. (In Russ.).
13. Migurskii A.V., Starosel'tsev V.S. Nappe structure of the Siberian platform junction zone with the Baikal-Patom plateau. *Sovetskaya geologiya*. 1989;7:9-15. (In Russ.).
14. Zolotov A.N. *Tectonics and oil and gas potential of ancient strata*. Moscow: Nedra; 1982, 240 p. (In Russ.).
15. Sobolev P.N., Shyganova O.V., Dykhan S.V. Prospects of increase in oil and gas potential of Pre-Cambrian deposits of Leno-Tungus province. *Russian Oil and Gas Geology*. 2009;6:62-71. (In Russ.). EDN: KYDZEX.
16. Sivtsev A.I., Timofeev N.G., Meshcheryakov V.A. Oil and gas potential of the northeast Predpatom trough. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):193-203. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-193-203>. EDN: BCBVZQ.
17. Migurskii F.A. On the assessment of oil and gas occurrence scale and prospects in the Pre-Patomskiy petroleum region in the light of evolution of views on tectonic framework of Siberian platform's south-eastern margins. *Russian Oil and Gas Geology*. 2019;2:39-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-2-39-54>. EDN: KPMWMP.
18. Timoshina I.D. *Geochemistry of organic matter of Upper Precambrian oil-producing rocks and oils of the south of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Geo; 2005, 166 p. (In Russ.).
19. Safronov A.F. Prospects for raw material base increasing for oil and gas production in the Republic of Sakha (Yakutia). *Nauka i tekhnika v Yakutii*. 2009;2:15-21. (In Russ.). EDN: MDRXRL.
20. Votyakov R.V. Geological structure and oil and gas potential prospects of Berezovsky depression (eastern part of Pre-Patomskiy oil and gas area). *Russian Oil and Gas Geology*. 2013;2:15-20. (In Russ.). EDN: PYDVIN.
21. Shemin G.G. et al. *Oil-and-gas prospects of regional reservoirs in Pre-Patom regional trough (Siberian Platform)*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018, 315 p. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Рапалецкая Лариса Александровна,
 кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
 профессор кафедры нефтегазовой геологии,
 Институт недропользования,
 Иркутский национальный исследовательский технический университет,
 г. Иркутск, Россия,
 raplarisa@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-7531-5004>



Larisa A. Rapatskaya,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Professor of the Department of Oil and Gas Geology,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ raplarisa@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-7531-5004>

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принятая к публикации 24.03.2025.

The article was submitted 28.02.2025; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 24.03.2025.

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

Научная статья

УДК 553.077

EDN: RVPXPZ

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-112-121



Определение ураганных проб на основании модального анализа

В.Л. Рупосов^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Проведение анализа ураганных проб требует особой внимательности, поскольку при подсчете запасов возможны ошибки, которые могут привести к необоснованному занижению или завышению запасов на участке рудного поля и сильно исказить истинную картину экономической состоятельности месторождения твердых полезных ископаемых. Наиболее часто применяемые методы определения ураганных проб основаны на статистическом анализе, позволяющем математически обосновать выявление выделяющихся из общего ряда проб. Тем не менее в некоторых случаях для месторождений третьей и четвертой групп сложности нужно использовать модифицированные методы построения гистограммы для выявления ураганных проб. Целью данного исследования являлась демонстрация возможности использования модального анализа, который позволяет выделить низкочастотные значения на гистограмме. Для удобства расчета количества классов были предложены формула и графический способ определения данного значения. Помимо частотного, проводился анализ пространственной составляющей распределения полезного компонента на месторождении, а также расположения ураганных проб на плане или разрезе. Данная методика позволяет определить пространственное скопление проб и в этом случае не относить их к ураганным. В статье продемонстрирована апробация указанного метода на основе россыпного месторождения золота, проведен расчет количества классов по предложенной методике, вычислены модальные значения, проведен пространственный анализ с использованием метода обратных взвешенных расстояний.

Ключевые слова: ураганные пробы, частотный статистический анализ, модальный анализ, пространственный анализ опробования

Для цитирования: Рупосов В.Л. Определение ураганных проб на основании модального анализа // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 112–121. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-112-121>. EDN: RVPXPZ.

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

Original article

Unusually high sample determination based on modal analysis

Vitaliy L. Ruposov^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The analysis of unusually high samples requires special accuracy, since possible errors in calculating reserves can lead to unjustified underestimation or overestimation of reserves at the ore field site and significantly distort the true picture of the economic viability of the solid mineral deposit. The most commonly used methods for determining unusually high samples are based on statistical analysis, which makes it possible to justify mathematically the identification of outstanding samples. Nevertheless, in some cases, modified histogram construction methods should be used for deposits of the third and fourth complexity groups to identify unusually high samples. The purpose of this study is to demonstrate the possibility of using modal analysis enabling identification of low-frequency values on a histogram. To make the calculation of the number of classes more convenient a formula and a graphical method for determining this value are proposed. In addition to the frequency analysis, the spatial component of the useful component distribution at the deposit is analyzed, as well as the location of unusually high samples on the plan or section. This method allows to determine the spatial clustering of samples and not to classify this case as unusually high samples. The article demonstrates the testing of this method based on a placer gold deposit. The number of classes is calculated according to the proposed methodology, modal values are calculated, and a spatial analysis is carried out using the inverse distance weighted method.

© Рупосов В.Л., 2025



Keywords: unusually high samples, frequency statistical analysis, modal analysis, spatial sampling analysis

For citation: Ruposov V.L. Unusually high sample determination based on modal analysis. *Earth sciences and subsoil use.* 2025;48(1):112-121. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-112-121>. EDN: RVPXPZ.

Введение

Проблеме проведения анализа ураганных проб посвящено множество исследований. Сложно перечислить все подходы, которые были сформированы и предложены разными учеными, встречаются в литературе и обобщения. Так, в работе А.М. Прерис «Определение и учет ураганных проб» описано 42 подхода к решению обозначенной проблемы [1]. Исследования влияния ураганных проб на результаты подсчета запасов месторождений продолжаются по сей день, для этого используются различные методы. Например, В.И. Снетков и А.А. Соловьев предлагают использование моделирования методом Монте-Карло [2, 3].

Использование статистических методов еще с середины XX в. повысило внимание к различным аспектам анализа моделей случайных распределений. Наибольший интерес вызывают асимметрические распределения, особенно с правой асимметрией [4–7], поэтому чаще всего ураганными значениями считают очень высокие пробы, отражающиеся на гистограмме в виде низкочастотных крайне правых значений. Часто исследователи используют методики, основанные на особенностях нормального распределения, к примеру, правило трех сигм, как называют использование тройного стандарта [5, 1]. Тем не менее Л.И. Шаманский отмечал, что не всегда данные опробования по месторождению соответствуют симметричному (гауссовскому) распределению. В настоящее время можно утверждать, что это происходит крайне редко. Использование логнормального распределения привело к появлению отдельных методов. Так, при внедрении геоинформационных технологий стали применять метод дезинтеграции и корректировки по среднему Сихеля [2, 8], однако хорошо он себя зарекомендовал только при логнормальном распределении.

Для анализа распределения проб массово применяют гистограмму, которая позволяет анализировать частоту встречи крайне низких или высоких проб [1, 4–6, 8–12]. Помимо гистограммы, исследователи используют график накопленной частоты (предполагается, что ураганная проба будет относиться к горизонтальной площадке на непрерывно возрас-

тающей кривой) [5, 8]. Такой метод основан на анализе характера изменения коэффициента вариации.

Можно выделить два этапа работы с ураганными пробами: на первом определяется такой критерий, как отнесение пробы к ураганной, на втором – значение, заменяющее ураганную пробу. Целью данного исследования являлось формирование метода отнесения пробы к ураганной с учетом неоднородности опробования и пространственного распределения оруденения.

На первом этапе к ураганным пробам можно отнести все единичные пробы, во много раз превышающие нормальное содержание и приводящие к существенному искажению истинного среднего [1]. Отмечается, что наибольшее влияние такие пробы оказывают на блоки с малым количеством разведочных выработок. Затем производится попытка дать расшифровку понятию «нормальное содержание» и приблизиться к пониманию истинного среднего [1].

Наряду с этим предложено взять пробу повторно. Если использовать контрольную часть керна, то полученные результаты оказываются близки к ураганной пробе. Тем не менее провести дополнительную скважину в некоторых случаях невозможно, поскольку процессы прохождения разведочных выработок завершены, техника может не присутствовать на месторождении, к тому же для проведения указанных исследований требуется создание нового проекта разведочных работ. В связи со снижением издержек на геологоразведочные работы владельцы компаний не желают нести дополнительные затраты. Получается так, что данные методы, несмотря на очень высокую достоверность, не применимы в современных условиях.

По мнению исследователя В.А. Филонюка, ураганные пробы являются не ошибкой опробования, а свойством сложного геологического поля, строение которого нелинейное, возможно, фрактальное [13]. Сложность иерархии рудных образований и несоответствие системы разведки природной неоднородности приводят к появлению проб, которые сильно превышают средние значения по месторо-



ждению, поэтому разведка сложных месторождений должна проводиться с учетом разных уровней иерархии рудного поля и сложности его формирования. Для этого в настоящее время реализуются методы опробования, основанные на исследованиях разных уровней иерархии (например, использование кустов скважин для понимания разных иерархических уровней оруденения) [14].

Еще одним надежным способом анализа ураганных проб является использование средневзвешенных формул определения содержаний, особенно убедительно он проявил себя при анализе бороздовых проб (Н.К. Скаковский) [1] и там, где есть возможность определить вес пробы на основе каких-либо количественных факторов. В случае с одиночной пробой без возможности внести вес данный подход не может быть применен. Применение метода интерполяции с помощью обратных квадратов взвешенных расстояний не дает эффекта, вес ураганной пробы при малых расстояниях до данной точки становится наиболее высоким, и пробы сильно выделяются на фоне среднего значения. Необходимо понимать, что при использовании линейной интерполяции на основе триангуляции еще больше необоснованно завышаются объем запасов и значение содержания полезного компонента по сравнению с методом обратных расстояний. В настоящее время в геологии можно встретить не очень характерные для данной науки методы, пришедшие, к примеру, из финансового менеджмента (например, метод межквартильного размаха) [5].

Материалы и методы исследования

На первом этапе исследования необходимо было определить, какие пробы относятся к ураганным. В работе А.М. Прерис [1] большое внимание уделяется методу выборочной статистики (статистических испытаний), или Монте-Карло, благодаря которому сделан вывод о том, что определение ураганных проб должно происходить через расчеты определенных порогов, при выходе значения за которые происходит их выявление. Большое влияние при применении данного метода оказывает количество проб в выборке. С ростом их числа порог становится выше, а выявленных ураганных проб меньше. Поэтому был сделан вывод о том, что ураганные пробы выявляются только при небольшом количестве опробований.

Указанный подход приводит к ошибке в определении среднего содержания – оно уменьшается эквивалентно количеству измерений, вернее на \sqrt{n} , чем подчеркивает нелинейную зависимость.

Такие исследователи, как Г.С. Букуров, З.Д. Низгурецкий и Ю.Ф. Перов использовали модальное значение для обоснования порога выявления ураганной пробы [1]. Они использовали тезис А.Б. Каждана, согласно которому ураганные пробы могут обладать как сверхвысокими значениями, так и очень низкими при введении показателя ε , позволяющего определить как верхний $+\varepsilon$, так и нижний $-\varepsilon$ порог, отображаемые на графике распределения. Для того чтобы метод был работоспособным и универсальным, было предложено выявлять этот показатель не от среднего и не от медианы, а используя модальное значение. Идея заключалась в том, что если в выборке будут содержаться пробы как со сверхвысоким, так и с очень маленьким значением, влияние на среднее содержание будет нейтрализоваться, а если будут встречаться только значения выше $+\varepsilon$, то среднее по данному блоку будет завышаться, значения же меньше $-\varepsilon$ будут снижать среднеарифметическое содержание.

А.М. Прерис выступает с критикой данного подхода, так как при опробовании месторождения редко встречаются случаи, когда значение проб соответствуют гауссовскому распределению. Правоасимметричные распределения имеют множество проб, которые не влияют на общее среднее, зато при смещении модального значения влево получаем большее количество высоких значений, которые можно отнести к ураганным, при этом смещение их среднеарифметического в большую сторону весьма существенно, что приводит к необоснованному занижению запасов.

При исследовании сложных месторождений на гистограмме часто появляются дополнительные модальные значения, которые не позволяют однозначно интерпретировать, от какой моды необходимо откладывать ε , что не дает этому способу стать универсальным. При этом анализ низкочастотных модальных значений как способ определения ураганных проб заслуживает внимания. При построении гистограммы можно наблюдать наличие низкочастотных значений, уходящих в правую или в левую сторону от среднего. В результате мы видим распределение с несколькими модальными значениями. При этом основная мода



может быть во много раз выше, чем крайние модальные значения, которые выпадают из основного ряда. Задача определения ураганных проб в этом случае сводится к вычислению количества классов гистограммы и определению низкочастотных модальных значений.

Если второй вопрос решается однозначно через аналитический расчет моды

$$M_o = x_{Mo} + h \frac{f_{Mo} - f_{-1}}{(f_{Mo} - f_{-1}) + (f_{Mo} - f_{+1})}, \quad (1)$$

где x_{Mo} – начало модального интервала; f_{Mo} – частота модального интервала; f_{-1} – предмодальная частота; h – величина интервала; f_{+1} – послемодальная частота, то по определению количества классов нет однозначного ответа, при этом существующие методы не удовлетворяют некоторым особенностям высококонтрастных месторождений [9, 15].

На сегодняшний день можно выделить несколько наиболее популярных методов определения количества классов k , в основном зависящих от числа значений выборки n [16, 17]. Так, правило Стерджесса основывается на расчете через логарифм:

$$k = 1 + \log_2(n). \quad (2)$$

Кроме того, используют эмпириическую формулу, которая выглядит следующим образом:

$$k = 1 + 3,32 \lg(n). \quad (3)$$

Правило Райса позволяет повысить количество классов, при больших значениях числа проб

$$k = 2^{\sqrt[3]{n}}. \quad (4)$$

Еще большее количество классов можно получить при использовании правила квадратного корня, который рассчитывается по следующей формуле:

$$k = \sqrt{n}. \quad (5)$$

Тем не менее все указанные способы не учитывают случаев, когда при большом значении ураганной пробы на гистограмме отображаются только два крайних класса, в которые попадают все значения: в один класс – низкочастотное (возможно, единственное крайне высокое значение), другой класс содержит все остальные данные. При возникновении данной ситуации прибегают к использованию эмпирического правила, когда количество классов выбирается между 5 и 20, обеспечивающим таким образом наглядность.

Количество классов для выборок проб, содержащих ураганные значения, должны быть увеличены. Необходимо учитывать разброс

данных, который может быть учтен через значения коэффициента вариации [18, 19]. При сильной неоднородности рудного поля показатель может быть крайне высоким, поэтому необходимо повышать количество классов для такого ассиметричного распределения. В результате исследования различных месторождений с ураганными пробами [11, 20–22] предлагается использовать следующую формулу для расчета количества классов с учетом неоднородности данных за счет введения в формулу значения коэффициента вариации V :

$$k = \sqrt{n}^{1.5 + \frac{1}{\log_5 V}}. \quad (6)$$

Благодаря использованию данного показателя количество классов будет увеличиваться в зависимости от значения относительного разброса V , при этом для нормального закона распределения, когда $V = 25\%$, будет соответствовать показателю по правилу квадратного корня (5).

Результаты исследования и их обсуждение

Для иллюстрации работы рассмотренного метода анализа были проведены расчеты на примере опробования россыпного месторождения золота третьей категории сложности. Рудное поле было опробовано 79 скважинами, определено содержание золота в песках, среднее содержание составляло 4022 mg/m^3 , коэффициент вариации был равен 209 %. Для корректного использования метода была построена гистограмма, определено количество классов. При использовании классического метода (2) получилось 9 классов, при использовании выведенной формулы (6) количество классов составило 11.

По данным распределения значений выборки по классам, представленным в таблице, составлена гистограмма (рис. 1), на которой были выделены несколько модальных значений.

С использованием формулы (1) были вычислены величины модальных значений (на графике их четыре): $M_{o1} = 2400 \text{ mg/m}^3$, $M_{o2} = 12417 \text{ mg/m}^3$, $M_{o3} = 27448 \text{ mg/m}^3$, $M_{o4} = 48035 \text{ mg/m}^3$.

В результате анализа было определено, что к ураганным пробам можно отнести низкочастотные моды, находящиеся в правой части, это крайне правый столбец, соответствующий самому высокому классу с одной попавшей в данный класс пробой, и два столбца с двумя значениями проб, отнесенных к данным классам. К третьему модальному значению относятся



Распределение значений выборки по классам
Sample value distribution by classes

Номер класса	Границы классов, мг/м ³		Количество	Частота	Накопленная частота
	Нижняя	Верхняя			
1	0	4575	64	0,810	0,81
2	4575	9150	6	0,076	0,886
3	9150	13724	1	0,013	0,899
4	13724	18299	3	0,038	0,937
5	18299	22874	0	0	0,937
6	22874	27449	2	0,025	0,962
7	27449	32024	2	0,025	0,987
8	32024	36599	0	0	0,987
9	36599	41173	0	0	0,987
10	41173	45748	0	0	0,987
11	45748	50323	1	0,013	1
Всего	-	-	79	1	-

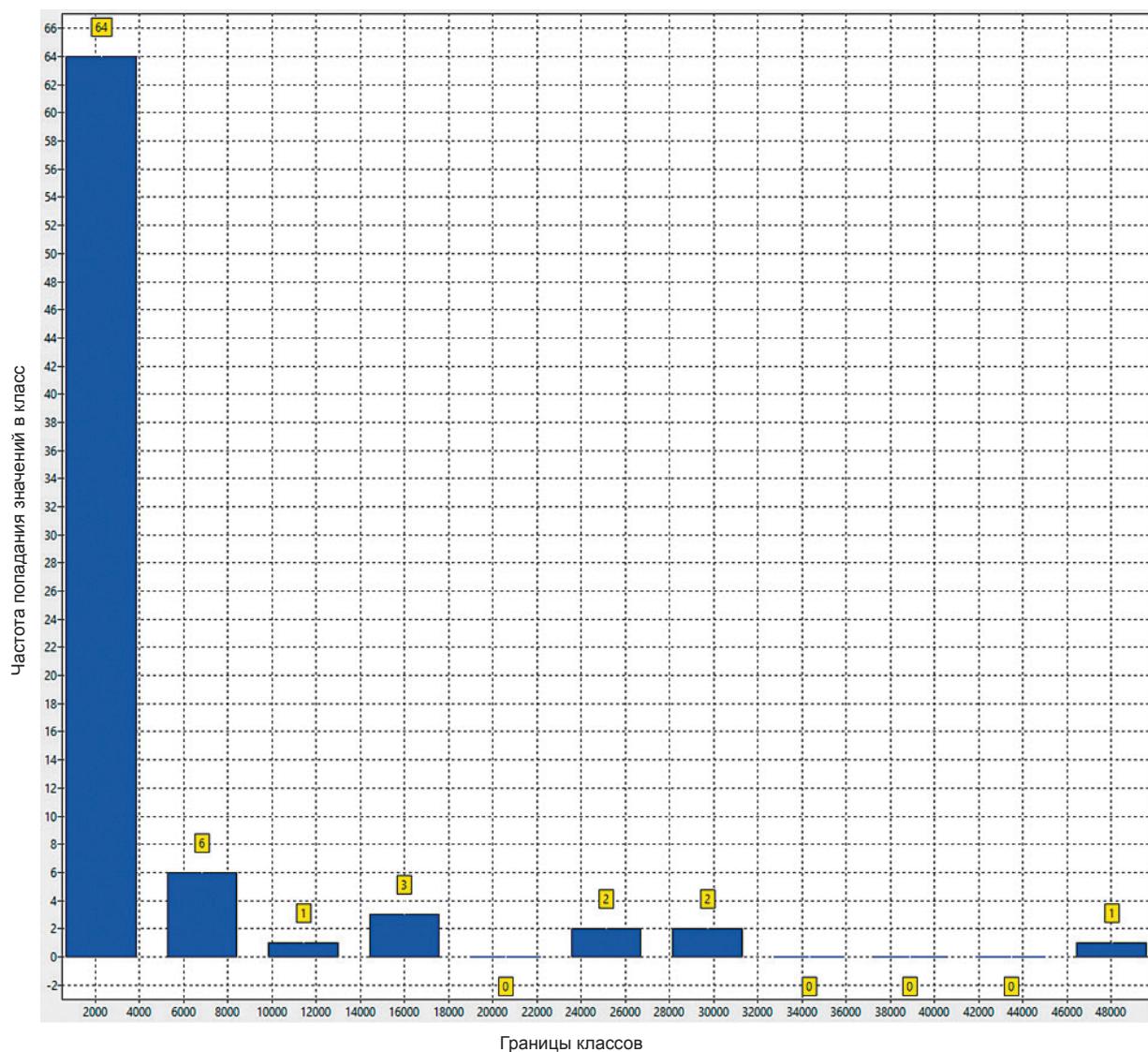


Рис. 1. Гистограмма частоты проб по классам
Fig. 1. Histogram of sample frequency by classes



пробы из скважин 15 (со значением содержания 23674), 20 (значение содержания – 28694 мг/м³), 39 (значение содержания – 23848 мг/м³), 74 (значение содержания – 23848 мг/м³), к четвертой mode относится значение содержания 50323 мг/м³ из скважины 75.

К определению ураганных проб необходимо подходить комплексно и смотреть не только на статистические показатели выборки, но и на пространственные зависимости. Если все пробы с высоким значением содержания полезного компонента и небольшой частотой, которые показаны крайне правыми столбцами

на гистограмме, на местности удалены друг от друга и разделены пробами с более низкими значениями содержаний, то их появление является случайным и не имеет пространственной зависимости. Для примера были выделены 5 ураганных проб. Поскольку необходимо было проверить, являются ли они пространственно независимыми, был построен план с цветовой картой, выполненной по методу обратных взвешенных расстояний со степенным коэффициентом, равным двум. На план были нанесены исходные данные с подписями номеров точек (рис. 2).

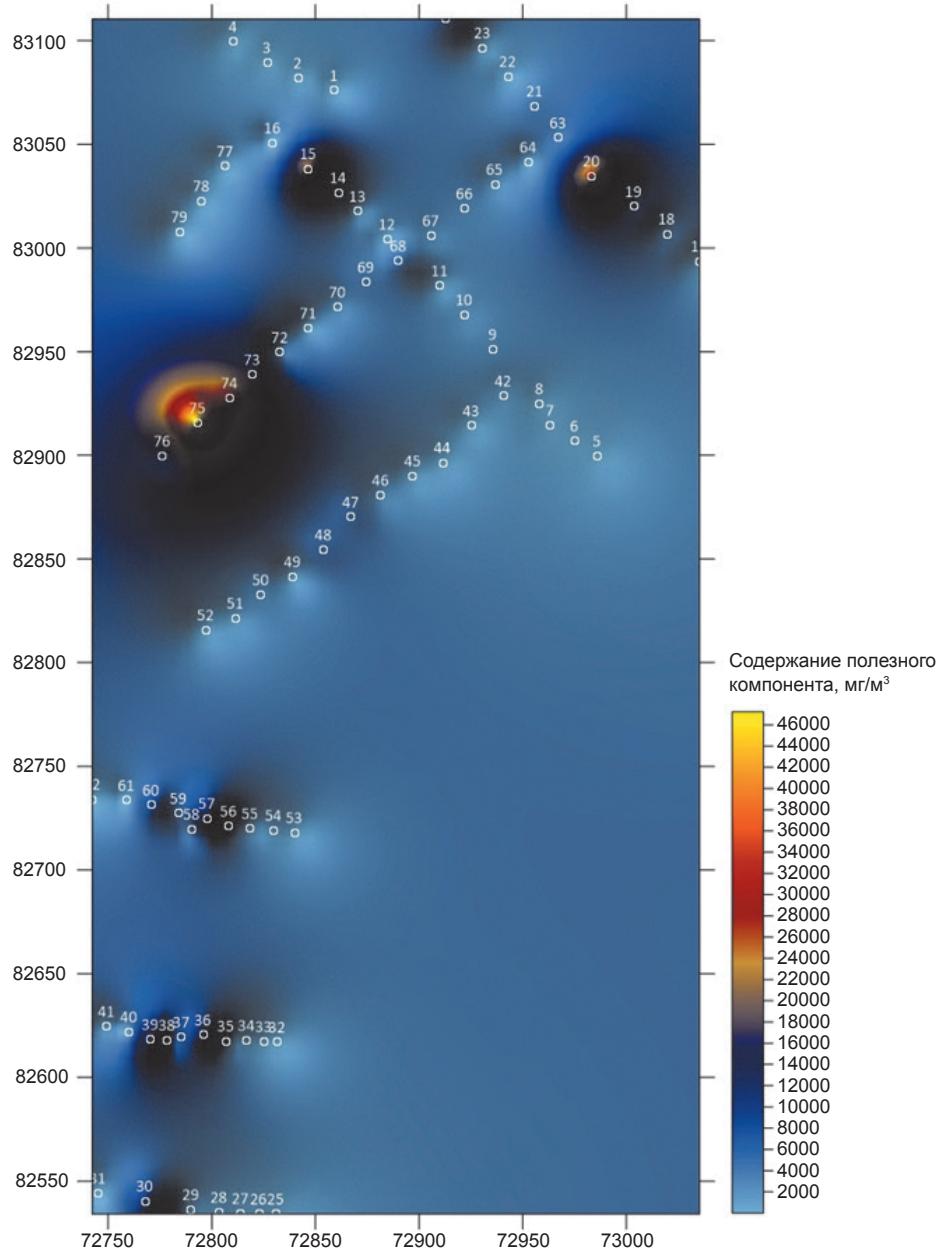


Рис. 2. План опробования участка рудного тела с положением разведочных скважин и интерполяцией методом обратных взвешенных расстояний

Fig. 2. Ore body section sampling plan with the position of exploration boreholes and inverse distance weighted interpolation



Для анализа пространственных зависимостей были выбраны самая высокая и низкочастотная пробы с номером скважины 75. Как показано на рис. 2, рядом с данной пробой находится другая ураганная пробы с номером скважины 74. При этом значение в скважине 76 составляет 14544, что в 3,6 раза превышает среднее содержание по блоку. Благодаря этому можно считать, что данные пробы формируют богатый участок недр и не могут быть отнесены к ураганным. Следовательно, ураганными пробами будут являться только пробы из 15, 20 и 39 скважины. Как показано на представленном плане, соседние пробы являются у таких скважин близкие к среднему по месторождению или ниже.

Заключение

В результате использования рассмотренного метода можно получить эффективный инструмент, позволяющий определять ураганные пробы на основании статистической методики

расчета модальных значений на основе построения гистограммы. Для определения количества классов гистограммы необходимо принимать во внимание не только размеры выборки (объем полученных проб), но и коэффициент вариации, позволяющий учитывать изменчивость параметра. Для различных значений объема выборки и коэффициентов вариации был построен график (рис. 3), который можно использовать для быстрого определения количества классов при построении гистограммы.

Еще одним выводом проведенного исследования является высокая зависимость определения ураганных проб от их пространственного расположения, что ранее (при использовании статистических методов) не учитывалось. Если предполагаемые ураганные пробы находятся рядом, то необходимо анализировать их в комплексе с соседними пробами, и если различие невысокое, то данные значения нужно учитывать без исправления при подсчете запасов. Роль геостатистиче-

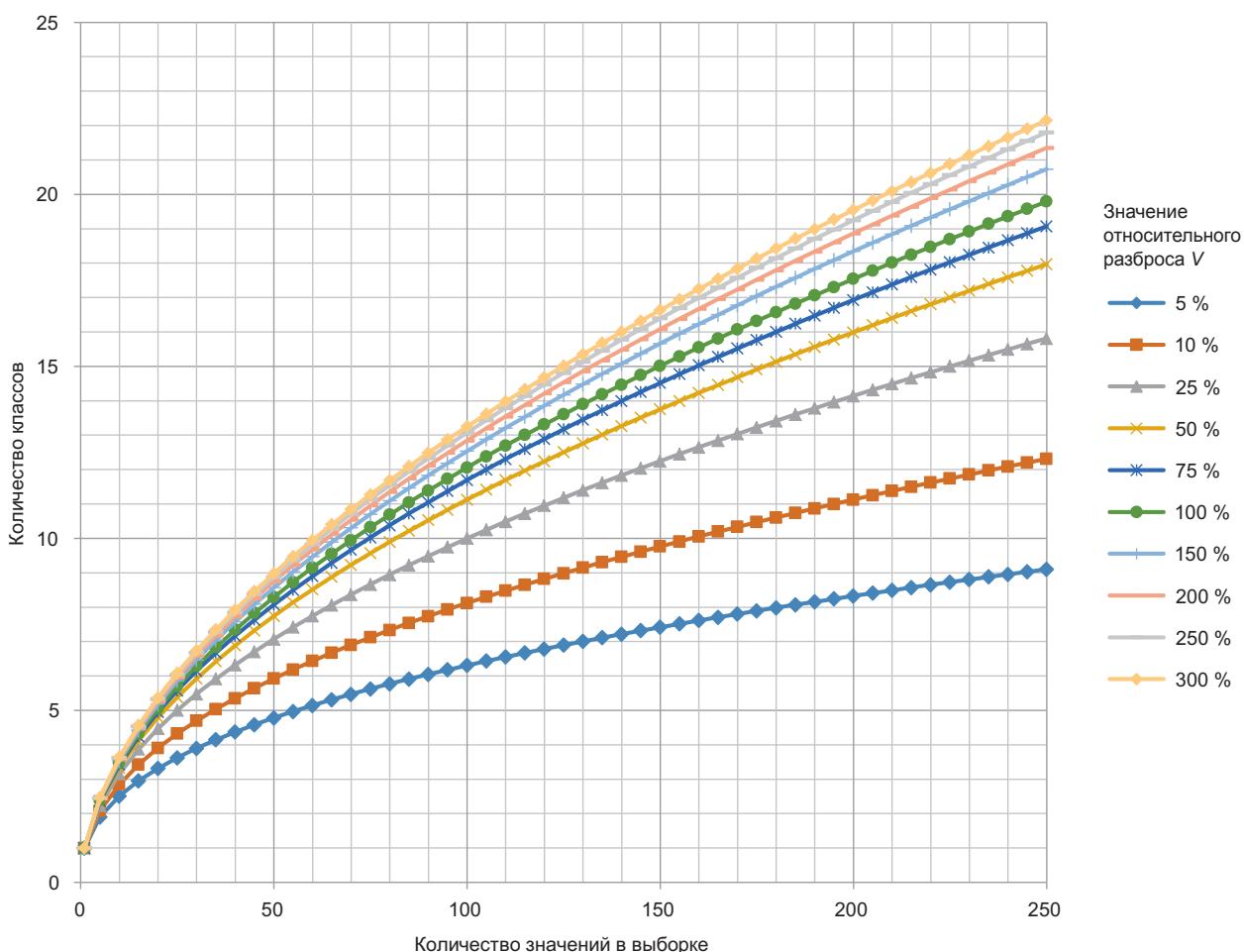


Рис. 3. Зависимость количества значений классов для построения гистограммы от коэффициента вариации по формуле (6)

Fig. 3. Number of class values for histogram construction vs variation coefficient according to formula (6)



ской особенности распределения полезного компонента в пространстве остается высокой и зачастую определяющей при анализе ураганных проб.

Список источников

1. Прерис А.М. Определение и учет ураганных проб. М.: Недра, 1974. 104 с.
2. Снетков В.И., Соловьев А.А. Оценка представительности данных разведки на месторождении «Ожерелье» с позиций теории случайных функций // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. № 2. С. 37–43. EDN: RTGRWD.
3. Снетков В.И., Соловьев А.А. Исследование явления ураганности проб в зависимости от принятых параметров кондиций при подсчете запасов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2. С. 33–39. <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-33-39>. EDN: WAXNBZ.
4. Козин В.З., Комлев А.С. Эффекты опробования, связанные с асимметрией распределений массовых долей компонентов в точечных пробах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11-1. С. 107–118. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_107. EDN: EZSIQJ.
5. Вяльцев А. С., Кириаков Г.А. Способы определения ураганных содержаний при оценке минеральных ресурсов // Успехи современного естествознания. 2024. № 6. С. 41–49. <https://doi.org/10.17513/use.38281>. EDN: VJQJCX.
6. Полевский А.Ю., Дмитрак Ю.В., Монаков Е.В. Использование инструментов построения всенаправленных вариограмм в ГГИС Micromine для золото-сульфидных месторождений с весьма сложным распределением золота // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 2. С. 20–28. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_20_24. EDN: USGVIS.
7. Конышев В.О. Опыт оценки погрешностей опробования и совершенствование методологии разведки месторождения с бонанцевым распределением золота // Отечественная геология. 2004. № 6. С. 4. EDN: HSELHH.
8. Живулько А. Подавление ураганных содержаний при оценке минеральных ресурсов // Золото и технологии. 2018. № 2. С. 46–49. EDN: YBMKKD.
9. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд / пер. с англ. Л.: Недра, 1980. 360 с.
10. Сатыбеков М.Б., Зарлыков А.К., Шамшиев О.Ш. Влияние метода оценки и ограничения выдающихся проб на вывод среднего содержания // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2024. № 1. С. 80–91. <https://doi.org/10.56634/16948335.2024.1.80-91>. EDN: ITPTPM.
11. Конышев В.О. К методике оценки содержаний Au в рудопроявлениях с крупным золотом Ортон-Балыксинского района, Кузнецкий Алатау // Руды и металлы. 2014. № 2. С. 44–64. EDN: SAHZQD.
12. Гончаренко С.Н. Построение индикаторной модели интерпретации границ геологических и рудных областей минерализации месторождения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 184–196. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-184-197>. EDN: SJJCAF.
13. Филонюк В.А. Некоторые философские аспекты развития современного научного знания // Новые идеи в философии. 1996. № 5. С. 113–118. EDN: EHINYH.
14. Пат. № 725656, Российская Федерация, G01V 9/00. Способ разведки золото-кварцевых жил / В.А. Филонюк, Н.Н. Блинков, Л.П. Власьевский. Заявл. 1985.06.07; опубл. 20.05.1999.
15. Кумбс Д. Искусство и наука оценки запасов. Перт: Coombes capability, 2008. 231 с.
16. Лобач В.И. Учет выдающихся подсчетных параметров на основе статистической неоднородности рудных месторождений // Руды и металлы. 2007. № 4. С. 42–49. EDN: KYJNRB.
17. Малютин Ю.А. Особенности моделирования зон минерализации по геологоразведочным данным // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2020. № 5. С. 45–54. EDN: HKULWJ.
18. Карпенко И.А., Куликов Д.А., Черемисин А.А. Повариантный подсчет запасов для ТЭО освоения и кондиций по месторождению Сухой лог и направления его последующей геолого-экономической оценки // Руды и металлы. 2008. № 2. С. 37–56. EDN: KYJOGV.
19. Сунцев А.С. О достоверности опробования россыпи по разведочным скважинам // Вопросы науки и образования. 2020. № 11. С. 6–8. EDN: OHASHY.
20. Чемезов В.В. О достоверности и представительности результатов разведки россыпей // Разведка и охрана недр. 2006. № 3. С. 29–32. EDN: KKNTCZ.
21. Засько Ю.Е. Геолого-маркшейдерские исследования запасов россыпного золота Верхне-Аркагалинского природно-промышленного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 8. С. 37–39. EDN: MVCIXN.
22. Абатурова И.В., Петрова И.Г., Болтыров В.Б., Клокова Ю.В. Особенности проведения экологической оценки на месторождениях рудного золота в Иркутской области и Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11-1. С. 5–17. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_5. EDN: EHXXKPZ.

References

1. Preris A.M. *Identification and accounting of high grade samples*. Moscow: Nedra; 1974, 104 p. (In Russ.).
2. Snetkov V.I., Soloviev A.A. Random function theory evaluation of Ozherelye field exploration data representativeness. *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*. 2013;2:37-43. (In Russ.). EDN: RTGRWD.
3. Snetkov V., Soloviev A. Study of the hurricane sample effect depending on the acceptable grade parameters under reserve calculation. *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*. 2016;2:33-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-33-39>. EDN: WAXNBZ.

4. Kozin V.Z., Komlev A.S. Sampling effects related to the asymmetry of distributions of mass fractions of components in point samples. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022;11-1:107-118. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_107. EDN: EZSIQJ.

5. Vyaltsev A.S., Kiryakov G.A. Techniques for determining extremely high grades in the estimation of mineral resources. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*. 2024;6:41-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.38281>. EDN: VJQJCX.

6. Polevsky A.Yu., Dmitrak Yu.V., Monakov E.V. Using micromine omnidirectional semivariogram building tools for gold-sulfide deposits with very complex gold distribution. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023;2:20-28. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_20_24. EDN: USGVIS.

7. Konyshев V.O. Experience of sampling error evaluation and development of methodology to explore a deposit with bonanza gold distribution. *Otechestvennaya geologiya*. 2004;6:4. (In Russ.). EDN: HSELHH.

8. Zhivul'ko A. High grade suppression in mineral resource estimation. *Zoloto i tekhnologii*. 2018;2:46-49. (In Russ.). EDN: YBMKKD.

9. David M. Geostatistical ore reserve estimation. Amsterdam: Elsevier, 1977, 364 p. (Russ. ed.: *Geostatisticheskie metody pri otsenke запасов руд*. Leningrad: Nedra; 1980, 360 p.).

10. Satybekov M.B., Zarlykov A.K., Shamshiev O.Sh. Effect of scoring method and limitation of outstanding samples on the inference of mean content. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2024;1:80-91. (In Russ.). <https://doi.org/10.56634/16948335.2024.1.80-91>. EDN: ITPTPM.

11. Konyshев V.O. On evaluation methodology of Au contents in ore occurrences with large gold in the Orton-Balyksinsky district, Kuznetsk Alatau. *Ores and Metals*. 2014;2:44-64. (In Russ.). EDN: SAHZQD.

12. Goncharenko S.N. Construction of an indicator model of boundaries interpretation of geological and ore areas of the deposit mineralization. *Izvestiya Tula State University*. 2021;5:184-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-184-197>. EDN: SJJCAF.

13. Filonyuk V.A. Some philosophical aspects of modern scientific knowledge development. *Novye idei v filosofii*. 1996;5:113-118. (In Russ.). EDN: EHINYH.

14. Filonyuk V.A., Blinkov N.N., Vlas'evskii L.P. *An exploration method of gold-quartz veins*. Patent RF, no. 725656; 1999. (In Russ.).

15. Coombes J. *The art and science of reserve estimation*. Pert: Coombes capability; 2008, 231 p. (In Russ.).

16. Lobach V.I. Accounting for outstanding calculation parameters based on statistical heterogeneity of ore deposits. *Ores and Metals*. 2007;4:42-49. (In Russ.). EDN: KYJNRB.

17. Malyutin Y.A. Features of modeling of mineralization zones based on geological exploration data. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2020;5:45-54. (In Russ.). EDN: HKULWJ.

18. Karpenko I.A., Kulikov D.A., Cheremisin A.A. Reserve variant calculation for the feasibility study of Sukhoi Log deposit development, conditions and directions of subsequent geological and economic assessment. *Ores and Metals*. 2008;2:37-56. (In Russ.). EDN: KYJOGV.

19. Suntsev A.S. On reliability of placer sampling in exploratory wells. *Problems of Science and Education*. 2020;11:6-8. (In Russ.). EDN: OHASHY.

20. Chemezov V.V. On reliability and representativity of placer exploration results. *Prospect and protection of mineral resources*. 2006;3:29-32. (In Russ.). EDN: KKNTCZ.

21. Zas'ko Yu.E. Geological and surveying studies of Verkhne-Arkagalinsky natural-industrial complex placer gold reserves. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2001;8:37-39. (In Russ.). EDN: MVCIXN.

22. Abaturova I.V., Petrova I.G., Boltyrov V.B., Klokoval Ju.V. Features of environmental assessment at ore gold deposits in the Irkutsk region and Yakutia. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022;11-1:5-17. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_5. EDN: EHXPZ.

Информация об авторе / Information about the author



Рупосов Виталий Леонидович,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия,
✉ ruposov@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2202-9034>

Vitaliy L. Ruposov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Surveying and Geodesy,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ ruposov@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2202-9034>



Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 21.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 21.03.2025.

The article was submitted 21.02.2025; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 21.03.2025.

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 организаций.

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 воспроизведимость 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 подрисунковой подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуточные 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 с разрешением 300 dpi.

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 .xis (MS Excel).

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.

Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, 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 непериодических 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. Для каждого из соавторов в конце статьи прописывается индивидуальный вклад, который выбирается из следующего списка: разработка концепции; разработка методологии; курирование данных; формальный анализ; получение финансирования; проведение исследования; административное руководство исследовательским проектом; предоставление ресурсов; разработка программного обеспечения; научное руководство; валидация результатов; визуализация; написание черновика рукописи; редактирование рукописи.

16. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночных подписи, библиография, конфликт интересов.

17. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

18. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

19. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

20. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

21. 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

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^{b✉}, А.Е. Сенченко^c

^{a,c}НИИГПИ «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-серicitовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серicitизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Финансирование:

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^{b✉}, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}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 Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.

Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **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 48 № 1 (90) 2025

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 28.03.2025 г. Формат 60×90/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 16,5.

Тираж 500 экз. Зак. 21. 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

