

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

# **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

**Том  
Vol. 47 № 3 2024**

# **EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE**

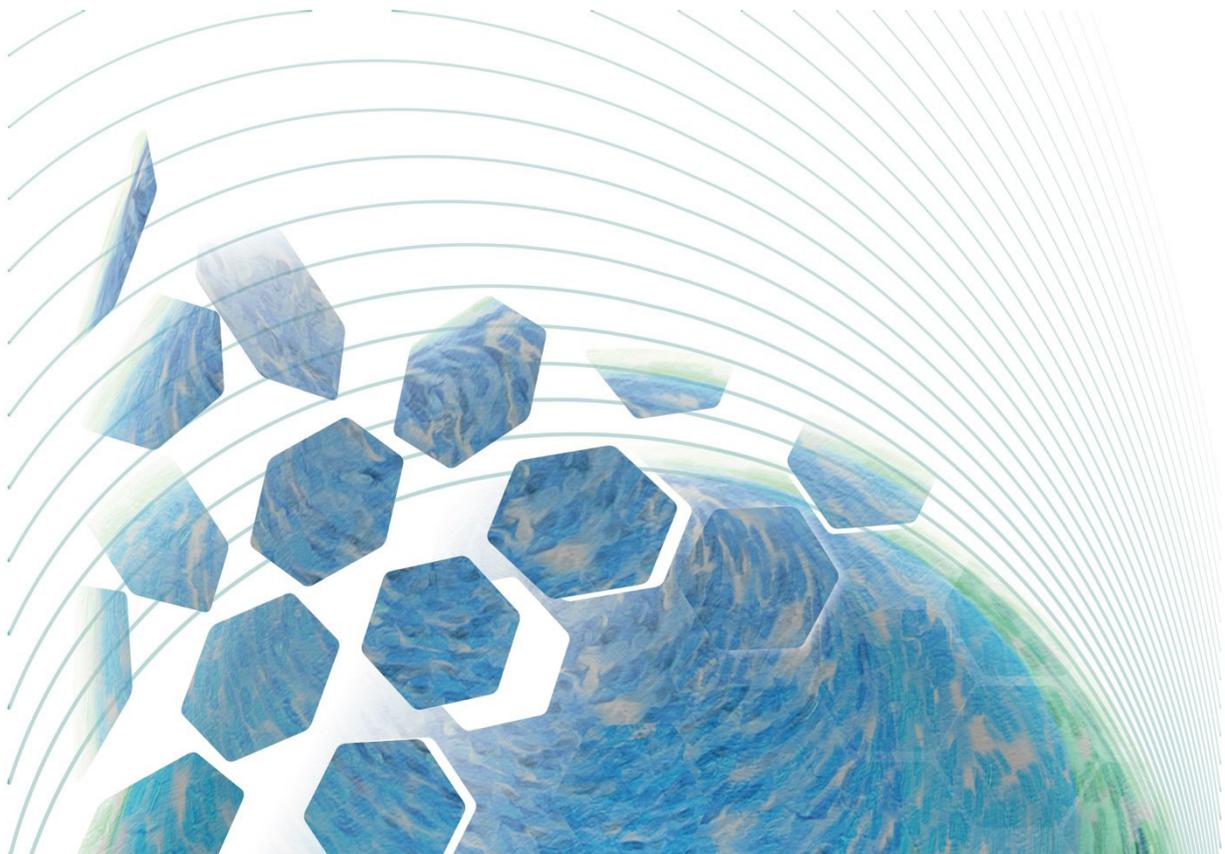
ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 47 № 3 2024  
Vol.

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE  
I NEDROPOL'ZOVANIE



## Редакционный совет

**Кузьмин М.И.**, академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Председатель редакционного совета:*

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

## Редакционная коллегия

*Главный редактор:*

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

*Заместитель главного редактора:*

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

*Ответственный секретарь:*

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

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

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

**Периодичность выхода** – ежеквартально

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

**Учредитель и издатель:**

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

**Издательство:**

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

**Адрес редакции:**

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

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

## Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### *Chairman of the Editorial Council*

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

## Editorial Board

### *Editor-in-Chief*

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

### *Deputy Editor-in-Chief*

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

### *Executive secretary*

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

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

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

## Publication frequency

A quarterly journal

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

## Founder and Publisher

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

## Publishing House

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

## Editorial Office

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

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



## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	246
-----------------	-----

### Геофизика

<b>Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О.</b> Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии.....	248
--	-----

<b>Хальбауер-Задорожная В.Ю.</b> Классификация геологических пород с точки зрения возникновения в них сейсмoeлектрических и электрокинетических эффектов .....	262
--	-----

### Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

<b>Кураличева А.И.</b> Условия формирования месторождений пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна .....	280
---	-----

<b>Матвеева И.В., Шигарова Т.О., Матвеев О.А.</b> Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород.....	289
--	-----

### Технология и техника геолого-разведочных работ

<b>Зайцев В.И., Карпиков А.В.</b> Анализ особенностей строительства эксплуатационных скважин в условиях многолетнемерзлых пород.....	302
--	-----

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

<b>Ерофеев В.В., Костерев А.Н., Валькова Е.Д., Матыцин В.В.</b> Система повышения качества сигнала радиотелеметрии для повышения эффективности дистанционного зондирования Земли с применением беспилотных летательных аппаратов в режиме кинематики реального времени.....	316
---	-----

<b>Рапацкая Л.А.</b> Осинский резервуар – модель геофлюидодинамической системы: очаги генерации, пути миграции и местоскопления углеводородов.....	329
--	-----

<b>Шадрин В.С., Климов В.Я., Большунов А.В.</b> Современное состояние технологий колонкового бурения подледниковых горных пород.....	342
--	-----

<b>К сведению авторов.....</b>	356
--------------------------------	-----



## C O N T E N T S

Contents.....	247
---------------	-----

### Geophysics

<b>Trofimov I.V., Bashkeev A.S., Savchenko V.A., Konshin I.O.</b> Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle measurements in primary gold prospecting in Bodaibo synclinorium.....	248
<b>Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu.</b> Rock classification according to seismo-electric and electrokinetic effect occurrence.....	262

### Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny

<b>Kuranicheva A.I.</b> Formation conditions of fresh groundwater deposits in Irkutsk artesian basin.....	280
<b>Matveeva I.V., Shigarova T.O., Matveev O.A.</b> Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods.....	289

### Technology and equipment of geological exploration

<b>Zaitsev V.I., Karpikov A.V.</b> Analysis of production well construction features in permafrost conditions.....	302
--	-----

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

<b>Erofeev V.V., Kosterev A.N., Valkova E.D., Matytsin V.V.</b> Radio telemetry signal quality enhancement system to improve Earth remote sensing unmanned aerial vehicles efficiency in real-time kinematics mode.....	316
<b>Rapatskaya L.A.</b> The Osinsky reservoir as a model of a geofluidodynamic system: hydrocarbon generation centres, migration routes and accumulation sites.....	329
<b>Shadrin V.S., Klimov V.Ya., Bolshunov A.V.</b> Current state of subglacial rock core drilling technologies.....	342
<b>Information for the Authors</b> .....	356



## ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК: 3179

EDN: PQZKDA

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261

## Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии

И.В. Трофимов<sup>a</sup>, А.С. Башкеев<sup>b</sup>, В.А. Савченко<sup>c</sup>, И.О. Коншин<sup>d</sup><sup>a-d</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия<sup>c</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

**Резюме.** Современная ситуация в горно-геологической отрасли требует ускорения и удешевления поисковых работ. Значительные перспективы для оптимизации геофизической разведки на сложноподходимых площадях с проблемным гальваническим заземлением имеют наземные бесконтактные методы и методы с применением беспилотных летательных аппаратов. Цель данного исследования заключалась в представлении результатов использования бесконтактной электроразведки (бесконтактное измерение электрического поля), обычно используемой при инженерных изысканиях, и магниторазведочных работ с применением беспилотных летательных аппаратов. Данный комплекс был направлен на поиск коренного золота в Бодайбинском районе Иркутской области. В работе дана краткая геологическая (геофизическая) ситуация и обоснование рациональной методики измерений. Геофизические работы проводились в масштабе 1:10000. Помимо этого, выполнено сопоставление полученных данных с областью применения бесконтактной технологии метода сопротивлений и предложены дополнительные и необходимые пункты к устоявшейся методике измерений. Установлено, что предложенный комплекс позволяет уверенно картировать основные перспективные на золотое оруденение геологические структуры за более короткий срок выполнения полевых работ.

**Ключевые слова:** бесконтактные измерения электрического поля, магниторазведка, беспилотный летательный аппарат, коренное золото, Вега

**Для цитирования:** Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О. Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 248–261. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261>. EDN: PQZKDA.

## GEOPHYSICS

Original article

## Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle measurements in primary gold prospecting in Bodaibo synclinorium

Ilya V. Trofimov<sup>a</sup>, Aur S. Bashkeev<sup>b</sup>, Valentin A. Savchenko<sup>c</sup>, Igor O. Konshin<sup>d</sup><sup>a-d</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia<sup>c</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The current situation in the mining and geological industry requires acceleration and reduction of the cost of exploration works. Ground-based contactless methods as well as methods using unmanned aerial vehicles have significant prospects for geophysical exploration optimization in difficult-to-access areas with faltering galvanic grounding. The purpose of the study is to present the results of both the use of contactless electrical exploration (electric field contactless measurement), which is commonly used in engineering surveys, and magnetic exploration performed with the use of unmanned aerial vehicles. The complex is aimed at searching for primary gold in the Bodaibo district of the Irkutsk region. The paper provides a brief description of the geological (geophysical) situation and justifies a rational measurement

© Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О., 2024



method. Geophysical works have been carried out on a scale of 1:10000. Also, the obtained data have been compared with the application field of the contactless technology of the resistivity method. As a result, additional and necessary theses have been proposed for the long-held measurement technique. It has been determined that the proposed complex allows confident mapping of the main geological structures promising for gold mineralization in a shorter period of field work.

**Keywords:** electric field contactless measurements, magnetometry, unmanned aerial vehicle, primary gold, Vega

**For citation:** Trofimov I.V., Bashkeev A.S., Savchenko V.A., Konshin I.O. Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle measurements in primary gold prospecting in Bodaibo synclinorium. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):248-261. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261>. EDN: PQZKDA.

## Введение

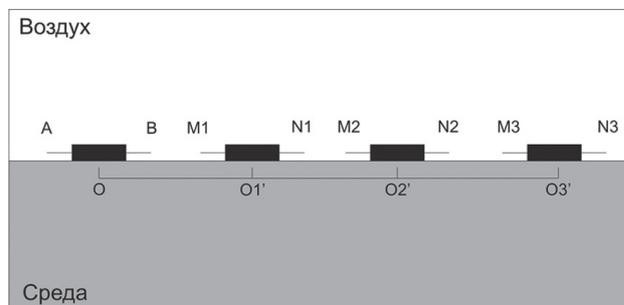
Существует большое количество электро-разведочных методов и методик съемки, существенно отличных друг от друга по целевому назначению и применимости к конкретным геологическим условиям. Выбор оптимальной методики электроразведочных работ зачастую представляет собой проблему. Значительный интерес в настоящее время имеют экспрессные площадные и при этом детальные геофизические работы, позволяющие картировать геологические структуры и не пропускающие объекты, которые ранее были не обнаружены при региональных или среднемасштабных исследованиях. Требуемый на поисковой стадии масштаб – не крупнее 1:10000, причем чаще всего используется 1:5000.

Для решения рудных задач зачастую используются гальванические методы, например, электротомография или СГ-ВП. Они обеспечивают высокую детальность и позволяют расчлнить верхнюю часть разреза, но при этом требуют большого количества времени и хорошего качества заземления, что не всегда возможно из-за курумов, болот, мерзлоты. Устаревшие методы профилирования типа ВП-СГ не позволяют изучать геологическое строение участка на глубину и даже не обеспечивают достоверное понимание глубинности работ. Методы электротомографии позволяют получать геофизические разрезы, но весьма дороги и недоступны для постановки в площадном варианте на поисковой стадии. Это приводит к необходимости создания новых экспрессных и дешевых методик, которые при этом обеспечивали бы не только профилирование, но и зондирование.

Одним из перспективных направлений электроразведки является бесконтактная технология метода сопротивлений (БИЭП). Данный метод уже описан во множестве работ различ-

ных российских и зарубежных авторов [1–4]<sup>1</sup>. Основной принцип схож с принципом действия четырехэлектродной установки вертикального электрического зондирования. Принципиальная разница в том, что в БИЭП используется незаземленный диполь или пластина, тем самым получается емкостное заземление.

Это делает возможным проведение электроразведочных работ в северных районах, где гальваническое заземление либо затруднено, либо же попросту невозможно. Также БИЭП позволяет значительно упростить и ускорить процесс выполнения полевых измерений за счет своей методики измерений по сравнению с гальваническими модификациями метода сопротивлений [5–7]<sup>2</sup>. На рис. 1 приведена концептуальная схема измерительной установки.



**Рис. 1. Схема измерительной установки, используемой при применении бесконтактных методов (дипольно-осевая расстановка)**

**Fig. 1. Diagram of the measuring unit for contactless methods (dipole-axial arrangement)**

Данная технология была апробирована в геофизическом комплексе совместно с магниторазведкой с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), где магниторазведка была в качестве основного квартирующего метода и уже успела зарекомендовать себя в подобных работах [8]. Использование

<sup>1</sup> Тархова А.Г. Справочник геофизика. Электроразведка. М.: Гостопттехиздат, 1963. 583 с.

<sup>2</sup> Груздев А.И. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10. М., 2017. 22 с.



БИЭП в комплексе обусловлено перспективами дальнейшего прироста данных; изучалась возможность дополнительного расчленения на подсветы и пачки основных структурных подразделений, которые, как известно, уверенно картируются в Бодайбинском районе и смежных районах участках Байкало-Патомского нагорья по данным БПЛА-магниторазведки и радиометрии [9–11]. В случае успешного решения данной проблемы за счет БИЭП, становится возможным быстро, точно и с небольшими затратами осуществлять выбор участков для бурения и горных работ.

**Объекты работ.** В статье показаны результаты, полученные на двух участках Бодайбинского синклиория с типичными ландшафтно-морфологическими и геологическими условиями. Первая площадь электроразведочных работ составила 5 км<sup>2</sup>, вторая – 8 км<sup>2</sup>. Таким образом, общая площадь составила 13 км<sup>2</sup>.

Участок № 1 характеризовался залесенностью на больших перепадах высот (соотношение пройденного пути по профилю и подъема могло достигать 1:1), что сопряжено с опас-

ностью получения травм участников полевого отряда и выводу из строя аппаратуры при неосторожном использовании. На относительно ровных участках (вершины гор) подобной залесенности не наблюдалось (рис. 2). Исходя из соображений безопасности и скорости работ, съемка в местах со сложной проходимостью не проводилась, из-за чего карта фактического материала имеет разрывы и отсутствующие части в пределах границ съемки.

Участок № 2 характеризовался относительно участка № 1 более сильной залесенностью даже на равнинах и малыми изменениями высотных отметок. С одной стороны, такая площадь является удобной для выполнения электроразведочной съемкой аппаратурой «Вега», так как участок более пологий, но выявилась проблема с радиосвязью аппаратурных элементов между собой (генератор/датчик – полевой компьютер).

**Основные геологические подразделения.** Аунакитская свита ( $R_3au_2^2$ ) подразделяется на три подсветы: нижнюю, среднюю и верхнюю. Многие крупные месторождения в Бодайбин-



Рис. 2. Фото участка работ  
Fig. 2. Work site image

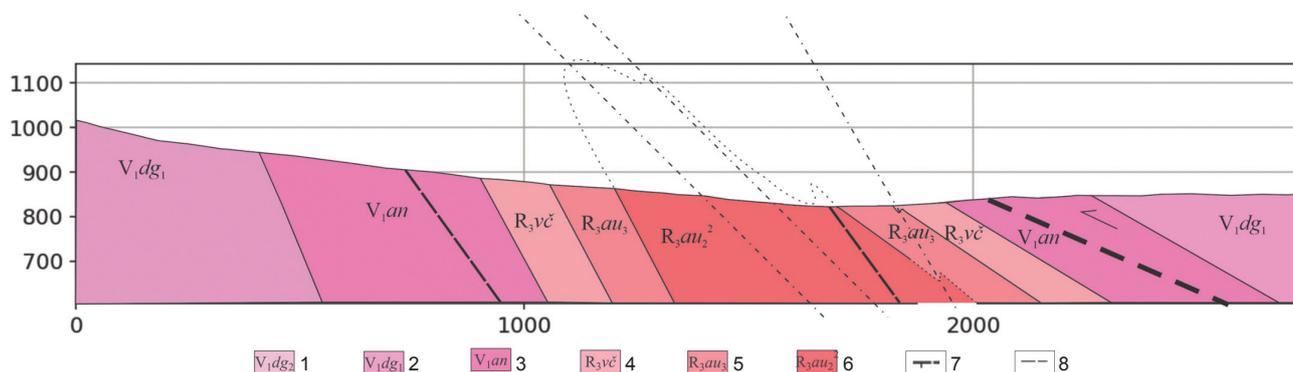


ском районе связаны с наличием аунакитской свиты, а именно – верхней пачкой ее средней подсвиты  $au_2^2$  (рис. 3). Это геологическое подразделение сложено черными сланцами и должно проявляться низкоомной аномалией за счет высокой углеродистости. Нижняя же пачка ( $au_2^1$ ) является слабоуглеродистой и имеет высокие значения удельного электрического сопротивления<sup>3-5</sup>.

Вачская свита ( $R_3v\check{c}$ ) слагает крылья и замки синклиналей и является региональным маркирующим горизонтом. Свита согласно залегает на породах аунакитской свиты с резко выраженным контактом. Сверху она перекрыта образованиями анангрской свиты, с которой контакт неясный, и формирует переходную пачку мощностью до 5 м. Породы свиты представляют высокоуглеродистые микросланцы, метаалевролиты, тонкие метапесчаники. Доминирующую позицию в разрезе занимают метаалевролиты серицит-кварцевого состава.

Образования анангрской свиты ( $V_1an$ ) традиционно подразделяют на две подсвиты, характеризующиеся различными условиями седиментогенеза и соответственно различными типами пород. Породы подвержены метасоматическим процессам, проявленным в виде мелкоочечной лимонитизации по карбонатным вкрапленникам анкерит-сидеритового ряда.

В строении нижней подсвиты догалдынской свиты ( $V_1dg_1$ ) по вещественному составу выделяются две пачки: нижняя песчаниковая углеродистая и верхняя сланцево-песчаниковая. Разрез нижней пачки ( $V_1dg_1^1$ ) представлен в нижней части темно-серыми углеродистыми мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми метапесчаниками с редкими прослоями темно-серых углеродистых алевритистых сланцев. Верхняя пачка ( $V_1dg_1^2$ ) характеризуется грубым переслаиванием зеленовато-серых, серых разномерных метапесчаников с резко подчиненными прослоями темно-серых углеродистых алевритовых сланцев.



**Рис. 3. Типичный геологический разрез перспективных площадей в Бодайбинском районе 1:10000:**

- 1 – догалдынская свита, средняя подсвита (песчаники темно-серые кварцевые с гематитом); 2 – догалдынская свита, нижняя подсвита (песчаники светло-серые и зеленовато-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые);
  - 3 – анангрская свита (песчаники серые неравномерно-средне-мелкозернистые кварц-слюдисто-полевошпатовые);
  - 4 – вачская свита (сланцы черные слюдисто-углеродисто-кремнистые); 5 – аунакитская свита, верхняя подсвита (песчаники светло-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 6 – аунакитская свита, средняя подсвита, верхняя пачка (темно-серые сланцы кремнисто-углеродисто-слюдистые);
  - 7, 8 – предполагаемые разрывные нарушения: 7 – надвиги, 8 – без видимого смещения
- Fig. 3. Typical geological section of promising areas in the Bodaibo district 1:10000:**
- 1 – Dogaldyn suite, middle subformation (dark grey quartz sandstones with hematite); 2 – Dogaldyn suite, lower subformation (light grey and greenish-grey quartz-mica-feldspar sandstones);
  - 3 – Anangra suite (grey uneven medium-fine grained quartz-mica-feldspar sandstones);
  - 4 – Vacha suite (black mica carbonaceous silica shales); 5 – Aunakit suite, upper subformation (light grey quartz-mica-feldspar sandstones); 6 – Aunakit suite, middle subformation, upper member (dark grey silica-carbonaceous-mica shales);
  - 7, 8 – supposed faults: 7 – thrusts, 8 – no visible displacement

<sup>3</sup> Кулаков А.Р. Отчет о результатах геофизических в пределах Мараканской рудоносной площади Бодайбинского рудного района за 1979–1982 гг. Иркутск, 1983.

<sup>4</sup> Агеев Ю.А., Яблоновский Б.В. Отчет Соргинской партии по результатам геологического доизучения масштаба 1:50000, проведенного в 1976–1979 гг. Иркутск, 1981.

<sup>5</sup> Григоров Э.Н. Отчет Ныгринской партии по геологическому доизучению масштаба 1:50000 по работам 1975–1977 гг. Иркутск, 1987.



## Материалы и методы исследования

Электроразведочные работы проводились высокочастотной электроразведочной станцией «Вега». Данная станция предназначена для проведения электроразведочных работ методом электропрофилирования и вертикального электрического зондирования бесконтактным методом (дипольное электрическое зондирование). «Вега» является многоканальной и позволяет работать с использованием четырех приемных датчиков одновременно.

Рабочая частота станции составляет 16 кГц, что является достаточно высокой частотой даже для бесконтактных измерений. Она позволяет работать лишь при разносах до 100 м. Генераторный блок станции позволяет зафиксировать выдаваемый ток на четырех значениях: 1, 3, 10 и 30 мА<sup>6</sup>. Также можно работать в режиме, при котором фиксации тока нет, и он может изменяться от записи к записи. Формула расчета кажущегося сопротивления имеет следующий вид:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I}.$$

При выполнении измерений на первой площади использовались диполи длиной 7,5 м. Расстояния между генератором и датчиками составляли 45, 67,5, и 90 м. Измерения проводились при фиксированном токе в 3 мА. Шаг по профилю составил 10 м.

На второй площади использовались диполи длиной 10 м. Разносы между генератором и датчиками составили 20, 40 и 60 м. Измерения проводились при динамически изменяющимся токе от 5 мА до 26 мА. Шаг по профилю составлял 20 м.

По результатам работ получены карты распределения кажущегося удельного электрического сопротивления на глубине, равной половине от разноса.

Для выполнения БПЛА-магнитометрии использовался мультироторный беспилотный комплекс SibGIS UAS с оверхаузеровским магнитометром семейства POS [9–11]. Для подготовки полетного задания с обтеканием рельефа использовался модуль SibGIS FlightPlanner [10]. Погрешность высоты установлена в пределах 10 % от номинальной высоты и постоянной скоростью полета, базовая высота съемки составляла 45 м от земли до датчика.

Скорость полета составляла 9 м/с. Измерения проводились 2 раза в секунду. Также, в соответствии с требованиями к маловысотной

магниторазведочной съемке, использовалась вариационная станция, которая выполняла наблюдения каждые 10 секунд.

Параллельно с геофизическими работами также были выполнены несколько опорных геологических маршрутов для более достоверной интерпретации геофизических данных. В то же время изучаемые площади характеризуются низкой степенью обнаженности, в связи с чем достоверно картировать контакты перспективных подразделений довольно проблематично. Общая протяженность маршрутов составила 8 км.

## Результаты исследования и их обсуждение

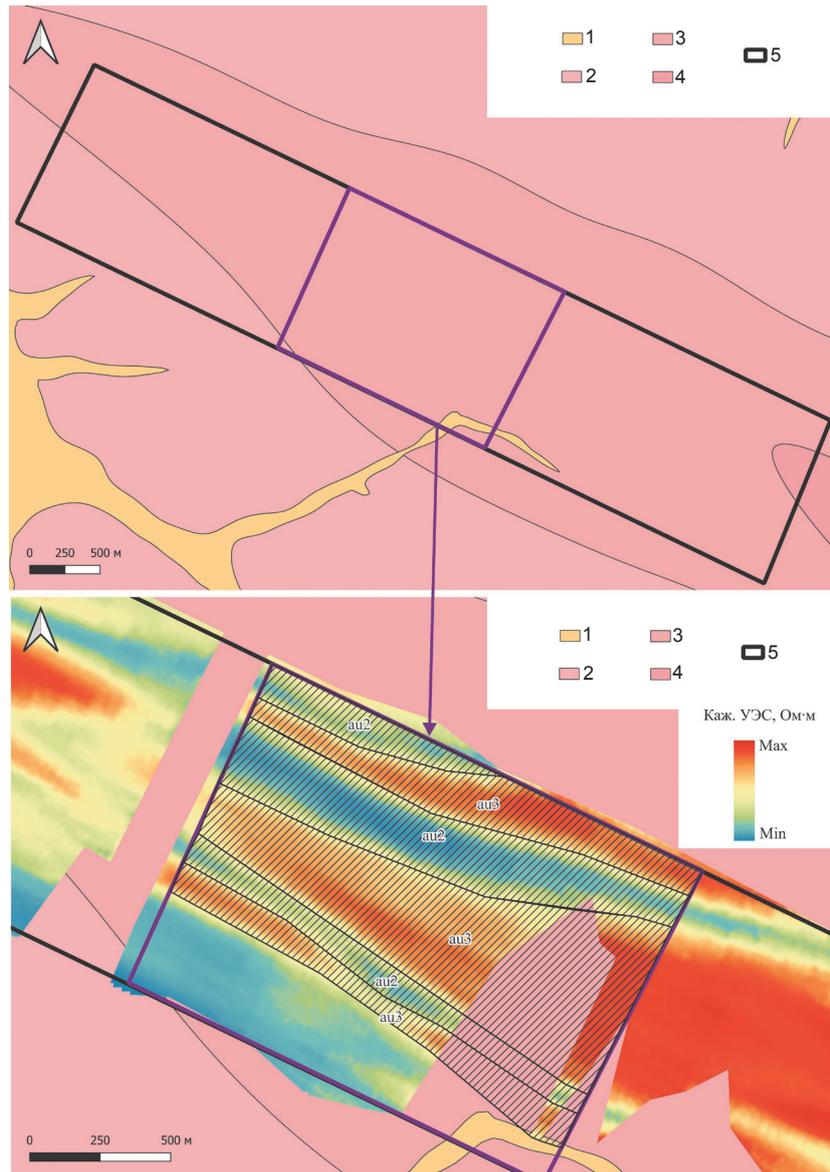
Как уже сказано ранее, многие крупные месторождения в Бодайбинском районе приурочены к ограниченному количеству структурно-вещественных позиций, одной из которых является приуроченность к близкядерным частям антиклиналей с присутствием аунакитской свиты (ау)<sup>3-5</sup>. Изучение возможностей обсуждаемого комплекса методов по картированию такой геологической обстановки и являются предметом данной работы, при этом на участке исследования № 1 проводились в пределах свиты (для разбиения свиты на подсвиты), а на втором работы проводились для уточнения границ геологических структур всего разреза, который представлен на рис. 3.

*Участок № 1.* По результатам электроразведочной съемки были выделены следующие подсвиты: средняя (ау<sub>2</sub>) и верхняя (ау<sub>3</sub>). Верхняя подсвита выделяется более высокими значениями сопротивления по сравнению со средней подсвитой (рис. 4).

*Участок № 2.* На рис. 5 представлена геологическая карта масштаба 1:50000, на которую были наложены результаты электроразведочной съемки.

По результатам анализа электроразведочной съемки (см. рис. 5) разделить геологический разрез (см. рис. 3) можно на три области по сопротивлению: Высокоомную (аунакитская свита), низкоомную (анангрская свита) и область со средними значениями сопротивления (вачская и догалдынская свиты).

*Анализ области применения и контроль данных.* Для анализа возможностей методов БИЭП по картированию горных пород с различными сопротивлениями и на различных глубинах были построены два графика зави-



**Рис. 4. Результаты электроразведочной съемки на участке № 1 на псевдоглубине исследования 45 м:**

*a* – обзорная карта площади работ № 1; *b* – выделенная фиолетовым цветом часть площади  
1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – аунакитская свита, верхняя подсвита;  
3 – аунакитская свита, средняя подсвита; 4 – аунакитская свита, нижняя подсвита;  
5 – граница участка № 1

**Fig. 4. Electrical exploration survey results on the site no. 1 at the investigation pseudo-depth of 45 m:**

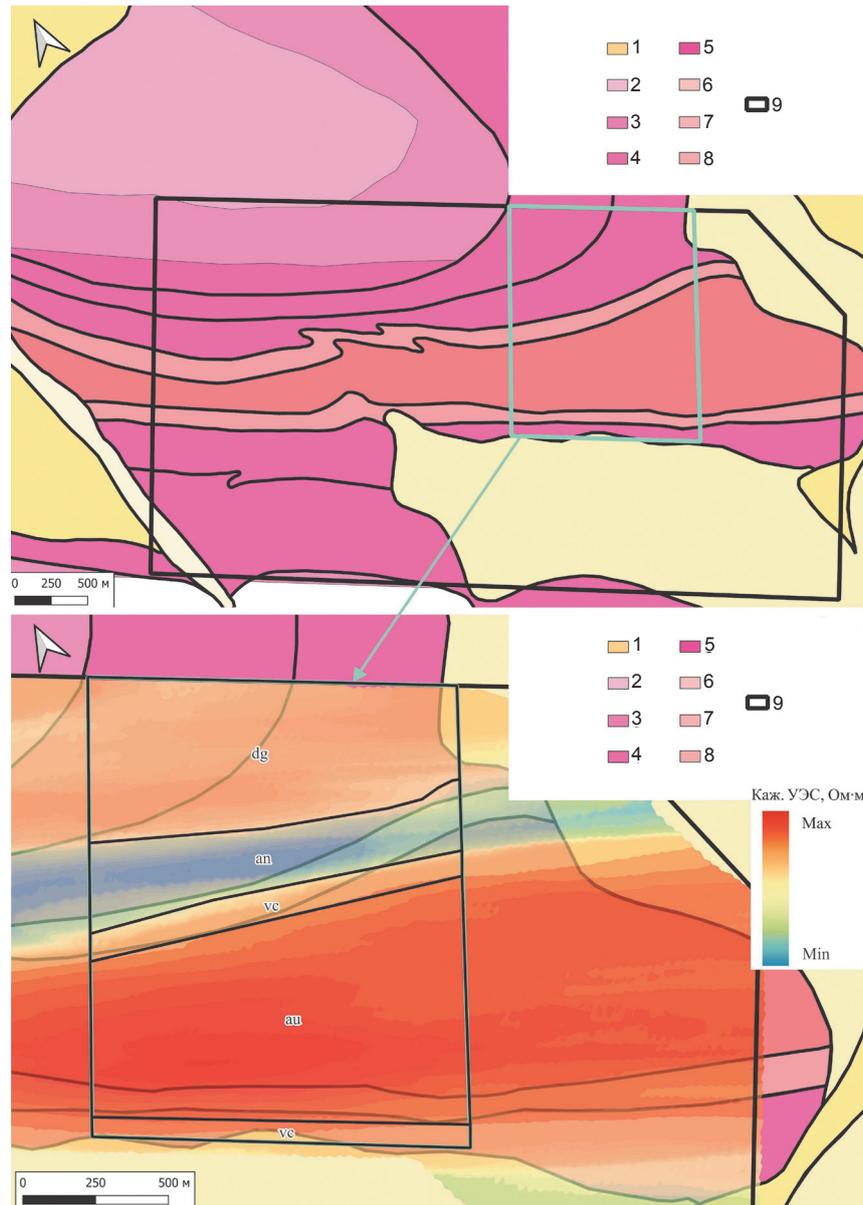
*a* – location map of the site no. 1; *b* – part of the site highlighted in purple  
1 – undifferentiated Quaternary deposits; 2 – Aunakit suite, upper subformation;  
3 – Aunakit suite, middle subformation; 4 – Aunakit suite, lower subformation;  
5 – boundary of the site no. 1

симости кажущегося сопротивления от разно-  
са между генератором и приемником (рис. 6)<sup>2</sup>.

Серым цветом обозначена область для ус-  
ловия поднятия измерительной установки на 30  
см от поверхности. Область применения БИЭП  
уменьшается с левой стороны при поднятии  
установки над поверхностью (выделено голу-  
бым цветом). В действительности не удается

располагать измерительную установку меньше,  
чем в 10 см над поверхностью земли из-за тра-  
вы, мха и кустов. Это говорит о том, что нижней  
возможной границей помех при проектировании  
работ стоит считать именно зеленую линию.

Из рис. 6 видно, что лишь менее 50 % изме-  
рений попадает в область количественной ин-  
терпретации. Из-за этого результаты инверсии



**Рис. 5. Геологическая карта предшественников**

**и результаты электроразведочной съемки на псевдоглубине 20 м:**

*a* – обзорная карта площади работ № 2; *b* – выделенная бирюзовым цветом часть площади

- 1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – догалдынская свита, средняя подсвита; 3 – догалдынская свита, нижняя подсвита; 4 – анангская свита, верхняя подсвита; 5 – анангская свита, нижняя подсвита; 6 – вачская свита; 7 – аунакитская свита, верхняя подсвита; 8 – аунакитская свита, средняя подсвита; 9 – граница участка № 2

**Fig. 5. Geological map of predecessors**

**and electrical exploration survey results at the pseudo-depth of 20 m:**

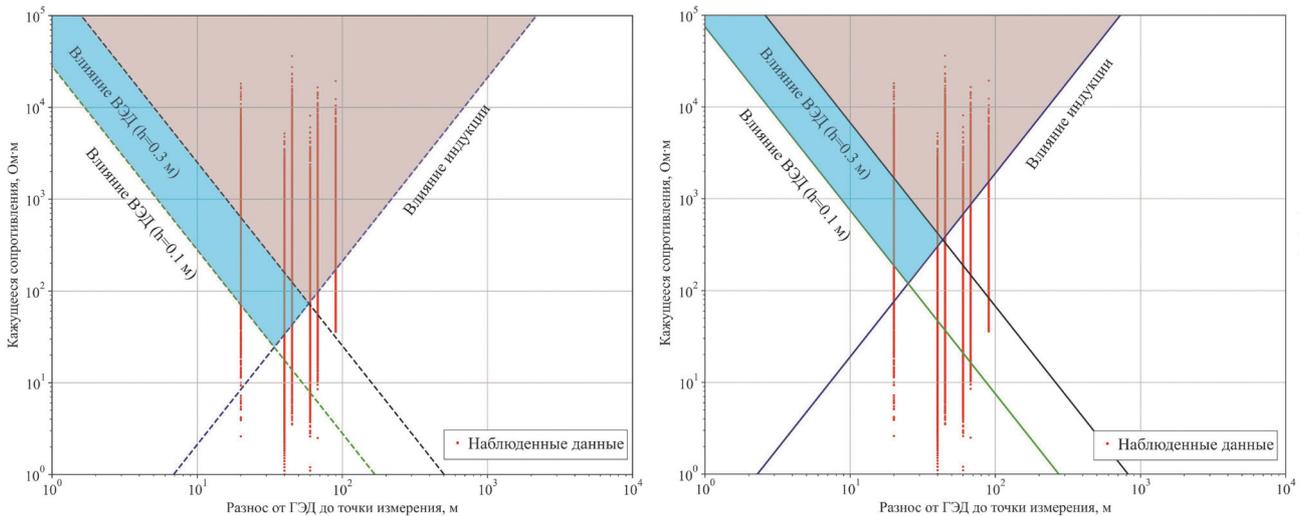
*a* – location map of the site no. 2; *b* – part of the site highlighted in turquoise

- 1 – undifferentiated Quaternary deposits; 2 – Dogaldyn suite, middle subformation; 3 – Dogaldyn suite, lower subformation; 4 – Anangra suite, upper subformation; 5 – Anangra suite, lower subformation; 6 – Vach suite; 7 – Aunakit suite, upper subformation; 8 – Aunakit suite, middle subformation; 9 – boundary of the site no. 2

должны вызывать множество вопросов. Исходя из рабочей частоты и используемых геометрических параметров установки многоканальный режим аппаратуры «Вега», полученные данные являются фактически бессмысленными для численного моделирования, и такие дан-

ные должны рассматриваться только с точки зрения качественной интерпретации.

Также помимо данных, которые попадают в раскрашенную зону, есть и значения вне области применения. В таких случаях можно говорить о том, что среда в точке, где прово-



**Рис. 6. Область применения бесконтактной технологии метода сопротивлений:**  
*a – качественная интерпретация; b – количественная интерпретация*  
**ВЭД – вертикальный электрический диполь; ГЭД – горизонтальный электрический диполь**  
**Fig. 6. Application area of the contactless technology of resistivity method:**  
*a – qualitative interpretation; b – quantitative interpretation*  
**VED – vertical electric dipole; HED – horizontal electric dipole**

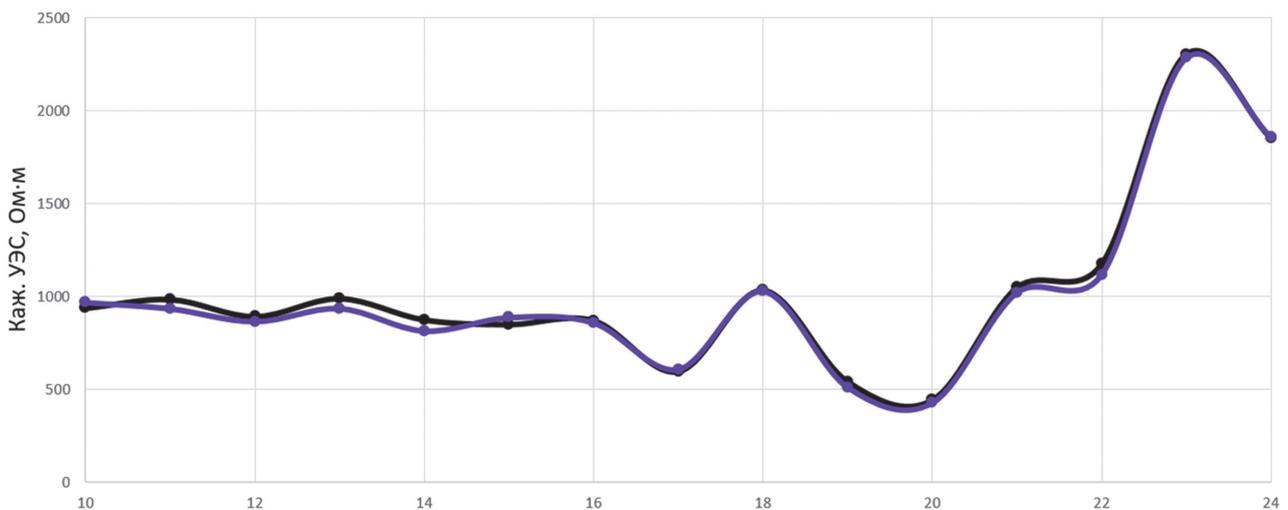
дилось измерение, характеризуется близповерхностным проводником.

С целью контроля качества полевых наблюдений на обоих участках исследования было выполнено более 5 % контрольных измерений от общего объема работ. Общее среднеквадратическое отклонение по параметру кажущегося удельного электрического сопротивления составило менее 10 Ом·м. Пример сходимости контрольных и наблюдаемых (рядовых) измерений представлен на рис. 7.

*Совместная геолого-геофизическая интерпретация.* Результатом совместной гео-

лого-геофизической интерпретации стали две уточненные геологические карты. Для примера возьмем участок № 2, так как именно на нем электроразведочные работы пересекли несколько структурных комплексов.

Беспилотная маловысотная аэромагнитная съемка позволяет выделить верхнюю пачку средней подсвиты аунакитской свиты верхнего рифея  $R_3au_2$  по положительной аномалии модуля вектора напряженности магнитного поля,  $R_3au_3$  – по значениям, переходным к более низким. Вачская свита  $R_3v\check{c}$  выделяется по внешней границе отрицательной магнитной анома-



**Рис. 7. График сходимости контрольных и рядовых измерений по одному из профилей на нескольких пикетах (псевдоглубина измерений 10 м)**  
**Fig. 7. Convergence graph of control and routine measurements along one of the profiles at several stations (measurement pseudo-depth is 10 m)**



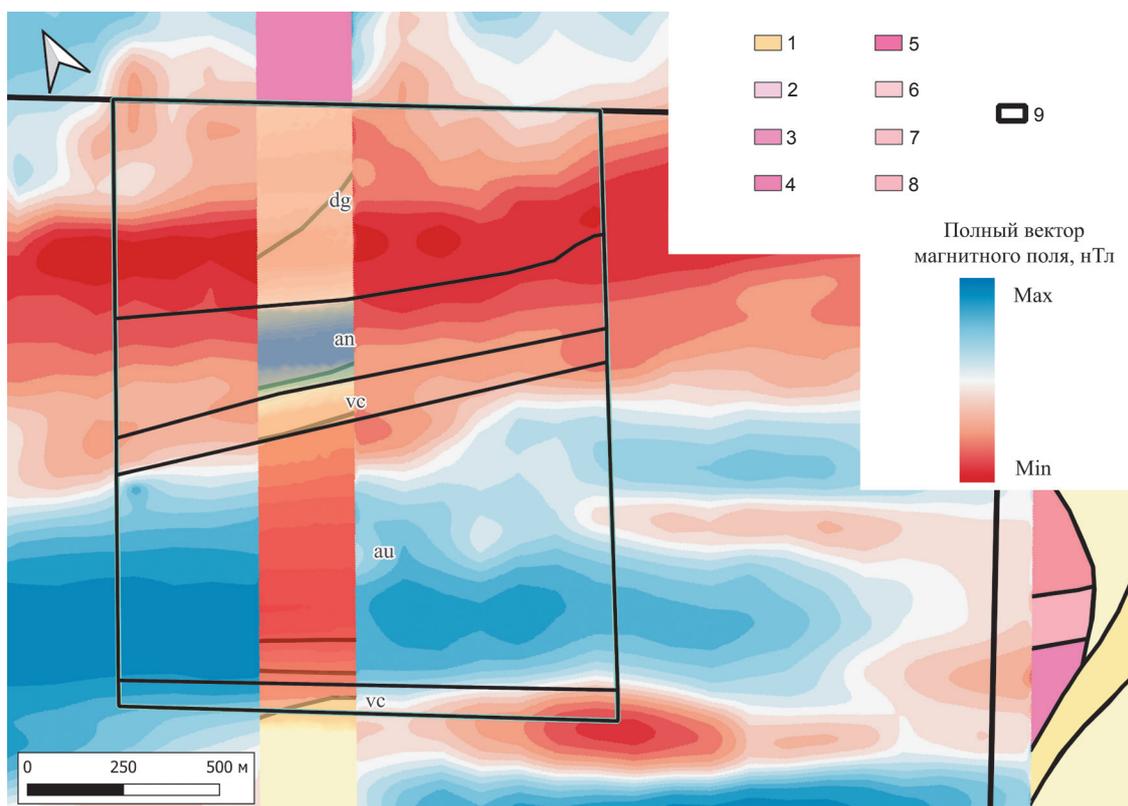
лии, которая отражает область распространения пород анангской свиты нижнего венда  $V_1an$ . Граница пород догалдынской свиты  $V_1dg$  характеризуется еще большим контрастным переходом от низких к высоким значениям, а контакт ее подсвит  $V_1dg_1$  и  $V_1dg_2$  подчеркнут узкой линейной отрицательной аномалией. Полученные линии наибольшего контраста магнитного поля согласуются с данными геологической съемки методом прямых наблюдений и были использованы для построения новой геологической карты участка (рис. 8).

Наземная электроразведка методом кажущихся сопротивлений, в дополнение к магниторазведке, позволяет дифференцировать среднюю и верхнюю подсвиты аунакитской свиты, а также вачскую свиту по зонам с разными диапазонами проводимости (см. рис. 4, 5). Догалдынская свита характеризуется отно-

сительно высоким сопротивлением, а зона переходных значений между догалдынской и вачской свитами соответствует полям выходов анангской свиты. Границы указанных областей заверяют полученные при магнитной и геологической съемке геологические границы.

Таким образом, каждое геологическое подразделение контрастно в магнитном поле или по кажущемуся сопротивлению, а половина из них,  $R_3au^2$ ,  $R_3au_3$ ,  $R_3v\check{c}$ ,  $V_1dg_1$  – в обоих полях, и результаты обеих съемок отлично увязываются между собой и с наблюдаемой геологической ситуацией (см. рис. 8).

По результатам съемки заметны отличия между данными геофизических работ и геологическими работами предшественников: так, простираение геологических структур продолжается на восток без особого смещения, хотя на геологической карте отмечено, что анангская



**Рис. 8. Сопоставление геофизических съемок (контурами наложены результаты интерпретации электроразведочных данных):**

- 1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – догалдынская свита, средняя подсвита; 3 – догалдынская свита, нижняя подсвита; 4 – анангская свита, верхняя подсвита; 5 – анангская свита, нижняя подсвита; 6 – вачская свита; 7 – аунакитская свита, верхняя подсвита; 8 – аунакитская свита, средняя подсвита; 9 – граница участка № 2

**Fig. 8. Comparison of geophysical surveys**

**(contours indicate interpretation results of electrical exploration data):**

- 1 – undifferentiated Quaternary deposits; 2 – Dogaldyn suite, middle subformation; 3 – Dogaldyn suite, lower subformation; 4 – Ananra suite, upper subformation; 5 – Ananra suite, lower subformation; 6 – Vach suite; 7 – Aunakit suite, upper subformation; 8 – Aunakit suite, middle subformation; 9 – boundary of site no. 2



свита на востоке смещается на север, на которой выполнено разделение аунакитской свиты на подсвиты, а также исправлено простираение анангрской и догалдынской свит (рис. 9).

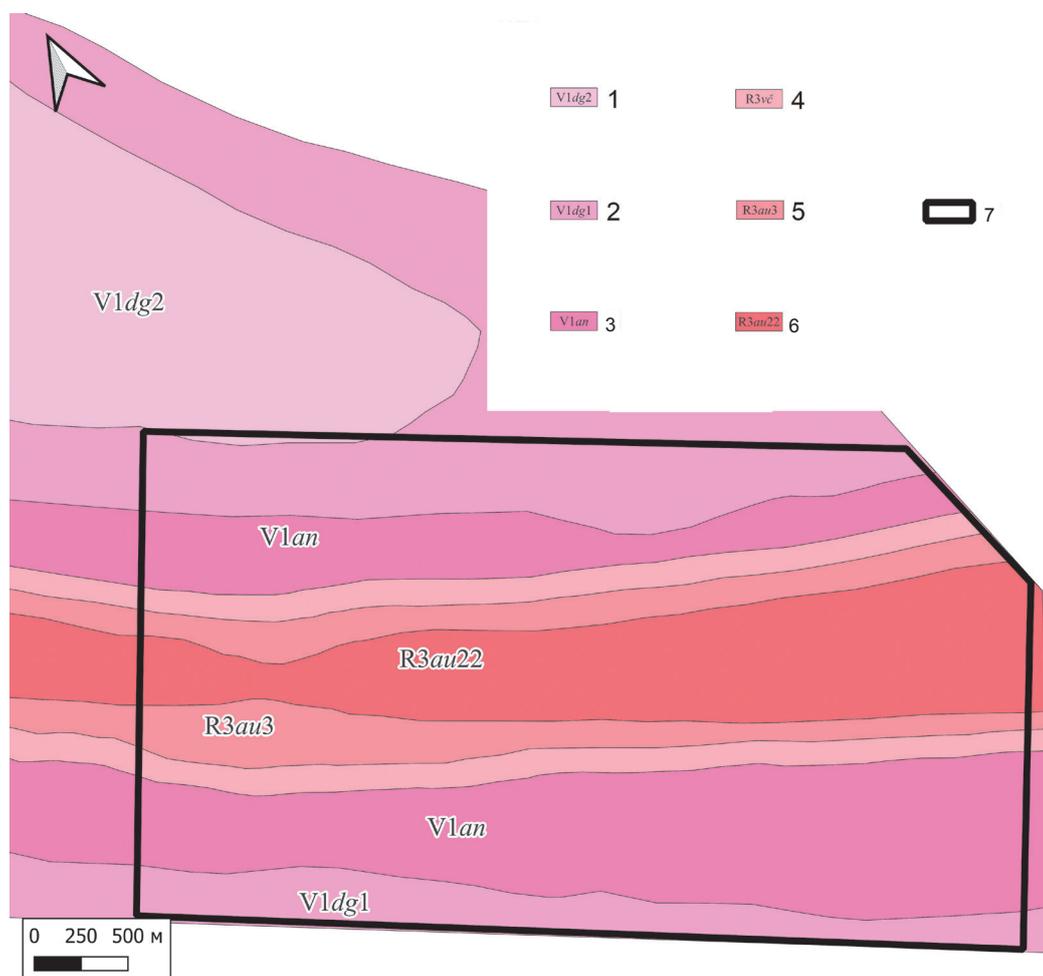
Таким образом, показано, что предложенный комплекс позволяет существенно (почти до 50 м) уточнить существующие геологические карты, что весьма важно для проектирования горных и буровых работ.

### Заключение

Показано, что комплекс БПЛА-магнитной съемки и бесконтактной электроразведки

позволяет существенно уточнить имеющиеся представления о геологическом строении площадей Бодайбинского синклиория, при этом магнитная съемка позволяет уверенно картировать геологические структуры, а электроразведка позволяет, в дополнение к этому, разделить перспективные структурно-вещественные подразделения (в данном случае – аунакитскую свиту) на среднюю сланцевую и верхнюю песчаниковую подсвиты.

Моделирование данных БИЭП показало слабый прирост результата от применения многоразносных установок, в связи с чем оп-



**Рис. 9. Уточненная геологическая карта участка № 2:**

- 1 – догалдынская свита, средняя подсвита (песчаники темно-серые кварцевые с гематитом); 2 – догалдынская свита, нижняя подсвита (песчаники светло-серые и зеленовато-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 3 – анангрская свита (песчаники серые неравномерно-средне-мелкозернистые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 4 – вачская свита (сланцы черные слюдисто-углеродисто-кремнистые); 5 – аунакитская, верхняя подсвита (песчаники светло-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 6 – аунакитская, средняя подсвита, верхняя пачка (темно-серые сланцы кремнисто-углеродисто-слюдистые); 7 – граница участка № 2

**Fig. 9. Refined geological map of the site no. 2:**

- 1 – Dogaldyn suite, middle subformation (dark grey quartz sandstones with hematite); 2 – Dogaldyn suite, lower subformation (light grey and greenish-grey quartz-mica-feldspar sandstones); 3 – Anangra suite (grey uneven-medium-fine-grained quartz-mica-feldspar sandstones); 4 – Vach suite (black mica-carbonaceous-silica shales); 5 – Aunakit suite, upper subformation (light grey quartz-mica-feldspar sandstones); 6 – Aunakit suite, middle subformation, upper member (dark grey silica-carbonaceous-mica shales); 7 – boundary of the site no. 2



тимальным вариантом можно считать профилирование на разносах 10–30 м.

Данный комплекс работ на каждом из участков были выполнены менее чем за месяц. На подобные работы методами, которые используют гальванические методы заземления, потребовалось бы в 1,5–2 раза больше времени, за счет постоянного заземления электродов от точки к точке. Таким образом, данный комплекс можно считать весьма рациональным.

Подобные работы, исходя из вышеописанного опыта, должны проводиться в режиме ограничения величины тока, как это было сделано на участке № 1. Иначе встает проблема с уравнением по уровню каждого из профилей. Таким образом, несмотря на предпочтительный режим работы на высоких токах, для хорошего соотношения сигнал-шум съемку лучше производить на более меньшем токе. Так, в методику полевых измерений следует либо добавить

предварительные работы для определения максимально допустимого уровня тока, либо же следует снимать на нескольких токах одни и те же точки для анализа чувствительности.

По итогу проведенного исследования, на основе сопоставительного анализа геологических карт предшественников и полученных объективных данных геофизической разведки, можно сделать вывод о необходимости обязательного применения предлагаемого комплекса для опережающего геолого-геофизического картирования площадей Бодайбинского синклиория, так как показанные погрешности архивных геологических материалов безусловно приведут к лишним затратам на горные и буровые работы, существенно превышающим стоимость геофизической разведки предложенным комплексом. Помимо этого, для дальнейшего развития бесконтактной технологии, требуется аппаратурный комплекс с меньшей рабочей частотой.

#### Список источников

1. Нахабцев А.С., Сапожников Б.Г., Яблчанский А.И. Электропрофилерование с незаземленными рабочими линиями. Л.: Недра, 1985. 96 с.
2. Скороходов Л.М., Старовойтов В.Н., Якупов В.С. Использование метода индуктивного приема в зимних условиях // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР: сб. статей / под ред. Б.Б. Евангулова, Н.П. Аникеева, А.П. Васильковского [и др.]. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1958. Вып. 13. С. 150–155.
3. Якупов В.С. Метод вертикальной составляющей плотности тока // Ученые записки ЛГУ. 1960. № 12. С. 59–62.
4. Якупов В.С. К теории метода вертикальной составляющей плотности тока // Геокриологические исследования: сб. статей / под ред. И.А. Некрасова. Якутск: Якутское книжное издательство, 1971. С. 200–206.
5. Бобачев А.А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // Разведка и охрана недр. 2002. № 10. С. 36–40.
6. Груздев А.И., Бобачев А.А. Особенности применения бесконтактных измерений в методе сопротивлений // Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития: сб. тр. конф. (г. Сочи, 28 сентября – 02 октября 2015 года). М.: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015. С. 178–183. EDN: UMRFSR.
7. Груздев А.И. Сравнение различных методик контактных и бесконтактных измерений в условиях средней полосы России // Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. С. 32–37. EDN: TEGEUV.
8. Снегирев Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магнито-разведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магнито-разведки // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 182–189. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>. EDN: CLAMAG.
9. Budyak A.E., Parshin A.V., Spiridonov A.M., Volkova M.G., Bryukhanova N.N., Bryansky N.V., et al. New results of geochemical and geophysical research of the Hadatkansky fault zone (North Transbaikal region) // Russian Journal of Pacific Geology. 2015. Vol. 34. Iss. 5. P. 54–63. <https://doi.org/10.1134/S1819714015050024>. EDN: VAFJYP.
10. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.] Низковысотная беспилотная аэромагнито-разведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
11. Паршин А.В., Абрамова В.А., Мельников В.А., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е. Перспективы благородной редкометаллической оруденности нижнепротерозойских отложений на территории Байкальской горной области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 53–59. EDN: PYAKEB.
12. Шевнин В.А., Бобачев А.А., Модин И.Н., Ялов Т.В. Различия результатов гальванических и индуктивных методов, новые примеры для ДИП и БИЭП // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 104–107. EDN: QLIKJP.
13. Груздев Р.В. Опытные работы методом бесконтактных измерений электрического поля (БИЭП) в модификации зондирования на дренажной системе водохранилища // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: сб. статей. (г. Чита, 27–30 ноября 2017 года). Чита: Изд-во Забайкальского государственного университета, 2017. С. 34–41. EDN: YLXYHA.
14. Модин И.Н., Груздев А.И., Скобелев А.Д. Сравнение бесконтактных электроразведочных комплексов // Инженерные изыскания. 2016. № 2. С. 46–53. EDN: VZLQAL.



## References

1. Nakhabtsev A.S., Sapozhnikov B.G., Yabluchansky A.I. *Electrical profiling with ungrounded working lines*. Leningrad: Nedra; 1985, 96 p. (In Russ.).
2. Skorokhodov L.M., Starovoitov V.N., Yakupov V.S. Using inductive method in winter conditions. In: Evangulov B.B., Anikeev N.P., Vas'kovskii A.P. (eds.). *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Severo-vostoka SSSR: sb. statei = Materials on Geology and Minerals of the Northeast of the USSR: collected articles*. Magadan: Magadanskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1958, iss. 13, p. 150-155. (In Russ.).
3. Yakupov V.S. Method of current density vertical component. *Uchenye zapiski LGU*. 1960;12:59-62. (In Russ.).
4. Yakupov V.S. On the theory of the current density vertical component method. In: I.A. Nekrasov (ed.). *Geokriologicheskie issledovaniya: sb. statei = Geocryological studies: a collection of articles*. Yakutsk: Yakutskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1971, p. 200-206. (In Russ.).
5. Bobachev A.A. Features of the electric field in the air during low-frequency contactless electrical soundings. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2002;10:36-40. (In Russ.).
6. Gruzdev A.I., Bobachev A.A. Application features of contactless measurements in the resistivity method. In: *Inzhenernaya, ugol'naya i rudnaya geofizika-2015. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sb. tr. konf. = Engineering, coal and ore geophysics-2015. Current state and development prospects: a collection of conference works*. 28 September – 02 October 2015, Sochi. Moscow: Mezhhregional'naya obshchestvennaya organizatsiya Evro-Aziatskoe geofizicheskoe obshchestvo; 2015, p. 178-183. (In Russ.). EDN: UMRFSR.
7. Gruzdev A.I. Comparison of different methods of contact and non-contact measurements in the midland of Russia. *Engineering surveys*. 2014;9-10:32-37. (In Russ.). EDN: TEGEUV.
8. Snegirev N.V., Gachenko S.V., Parshin A.V. Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):182-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>. EDN: CLAMAG.
9. Budyak A.E., Parshin A.V., Spiridonov A.M., Volkova M.G., Bryukhanova N.N., Bryansky N.V., et al. New results of geochemical and geophysical research of the Hadatkandsky fault zone (North Transbaikalian region). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2015;34(5):54-63. <https://doi.org/10.1134/S1819714015050024>. EDN: VAFJYP.
10. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structuralgeological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geography and Natural Resources*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
11. Parshin A.V., Abramova V.A., Melnikov V.A., Razvozhzaeva E.A., Budyak A.E. Prospects of noble and rare metal mineralization in Lower Proterozoic sediments of Baikal Mountain region. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;3:53-59. (In Russ.). EDN: PYAKEB.
12. Shevnin V.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Yalov T.V. Difference in galvanic and inductive methods 'results, new examples for dipole induction profiling and contactless measurements of electric field. *Journal of Mining Institute*. 2013;200:104-107. (In Russ.). EDN: QLIKJP.
13. Gruzdev R.V. Experimental work by the method of contactless measurements of electric field (CMEF) in modification of sensing on reservoir drainage system. In: *Kulaginskije chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: sb. statei = Kulagin Readings: Equipment and Technology of Production Processes: collected articles*. 27–30 November 2017, Chita. Chita: Transbaikalian State University; 2017, p. 34-41. (In Russ.). EDN: YLXYHA.
14. Modin I.N., Gruzdev A.I., Skobelev A.D. Comparison of contactless electrical exploration systems. *Engineering surveys*. 2016;2:46-53. (In Russ.). EDN: VZLQAL.

## Информация об авторах / Information about the authors



### Трофимов Илья Владимирович,

инженер-исследователь,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

✉ [itrofimov@geo.istu.edu](mailto:itrofimov@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>

### Ilya V. Trofimov,

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

✉ [itrofimov@geo.istu.edu](mailto:itrofimov@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>

**Башкеев Аюр Саянович,**

младший научный сотрудник департамента геофизики,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальных исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
abashkeev@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

**Aiur S. Bashkeev,**

Junior Researcher of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
abashkeev@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

**Савченко Валентин Андреевич,**

инженер-исследователь,  
Институт «Сибирская школа Геонаук»,  
Иркутский национальных исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
инженер-исследователь,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ itrofimov@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0000-4915-1051>

**Valentin A. Savchenko,**

Research-Engineer,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
Research-Engineer,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,  
Irkutsk, Russia,  
✉ itrofimov@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0000-4915-1051>

**Коншин Игорь Олегович,**

инженер департамента геоинформатики,  
Институт «Сибирская школа Геонаук»,  
Иркутский национальных исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
itrofimov@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0006-5967-1281>

**Igor O. Konshin,**

Engineer of the Geoinformatics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
itrofimov@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0006-5967-1281>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

И.В. Трофимов – подготовка статьи, обработка электроразведочных данных по участку № 2.

А.С. Башкеев – обработка электроразведочных данных по участку № 1.

В.А. Савченко – описание геологии.

И.О. Коншин – описание магниторазведки при помощи беспилотных летательных аппаратов.

Ilya V. Trofimov prepared the article for publication, processed electrical exploration data on the site no. 2.

Aiur S. Bashkeev processed electrical exploration data on the site no. 1.

Valentin A. Savchenko provided geology description.

Igor O. Konshin described unmanned aerial vehicle magnetic exploration.



### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов 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 11.08.2024; одобрена после рецензирования 21.08.2024; принята к публикации 02.09.2024.

The article was submitted 11.08.2024; approved after reviewing 21.08.2024; accepted for publication 02.09.2024.



## ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК: 551.37

EDN: FJKFMC

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-262-279



## Классификация геологических пород с точки зрения возникновения в них сейсмoeлектрических и электрокинетических эффектов

В.Ю. Хальбауер-Задорожная<sup>a✉</sup><sup>a</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Сейсмoeлектрический эффект и эффект вызванной поляризации электроосмотического типа относятся к разряду электрокинетических явлений. Теоретические основы этих явлений базируются на уравнениях Гельмгольца – Смолуховского. В первом случае это потенциалы течения, во втором – электроосмос. Однако не в каждом типе горных пород возникают значимые по амплитуде электрокинетические явления. Используя математические представления М. Био об учете в волновом уравнении, движение жидкости относительно твердой матрицы для медленных сейсмических волн и задачи Р. Чандлера об установлении давления внутри поры, были проведены расчеты амплитуды сейсмoeлектрического эффекта в пористых горных породах. Цель данного исследования заключалась в представлении результатов анализа амплитуд электрокинетических эффектов, возникающих либо при наложении на породу градиента давления, либо при разности потенциалов, базируясь на классификации Ф. Гассмана о связях между компонентами, слагающими горные породы, выделяющей породы с совершенной, несовершенной и отсутствующей связью между фазами. Было показано, что в породах с отсутствующей связью между компонентами, где заполнитель порового пространства свободно циркулирует в нем и поры хорошо связаны между собой, сейсмoeлектрический эффект не возникает. В породах с совершенной связью движения поровой влаги в порах также не происходит, электрокинетические явления в таких породах подавлены. Сейсмoeлектрический эффект и электроосмотические явления возникают лишь в породах с несовершенной связью между компонентами (породы с низкой, средней и частично высокой проницаемостью (кроме глин)) с радиусом пор  $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$  м. Эффекты вызванной поляризации методом становления можно обнаружить лишь при значениях постоянной спада вызванной поляризации  $\sim 1 \mu\text{с} - 1 \text{ мс}$ .

**Ключевые слова:** электрокинетические явления, сейсмoeлектрический эффект, электроосмос, радиус поры, связи между компонентами

**Для цитирования:** Хальбауер-Задорожная В.Ю. Классификация геологических пород с точки зрения возникновения в них сейсмoeлектрических и электрокинетических эффектов // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 262–279. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-262-279>. EDN: FJKFMC.

## GEOPHYSICS

Original article

## Rock classification according to seismo-electric and electrokinetic effect occurrence

Valeriya Yu. Hallbauer-Zadorozhnaya<sup>a✉</sup><sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The seismoelectric effect and the effect of induced polarization of the electro-osmotic type belong to the category of electrokinetic phenomena. The theoretical foundations of both effects are based on the Helmholtz – Smoluchowski equations applied to streaming potentials and electro-osmosis. However, electrokinetic phenomena of significant amplitude do not occur in every type of rocks. Using the mathematical concepts of M. Biot who regarded the fluid motion relative to a solid matrix for slow seismic waves in the wave equation and R.N. Chandler's problem on transient pressure inside a pore, the amplitude of seismoelectric effect in porous rocks has been calculated. The purpose of the study is to present

© Хальбауер-Задорожная В.Ю., 2024



the analysis results of the amplitudes of electrokinetic effects that occur either when a pressure gradient is imposed on the rock or when there is a potential difference, based on F. Gassman's classification of the relationship between the components of distinguishing rocks with perfect, imperfect and absent connections between the phases. It has been shown that seismoelectric effect does not occur in rocks with no bonding between the components, where the pore filler freely circulates in the pore space and pores are well connected to each other. The rocks with perfect connection also feature no motion of pore moisture as a result electrokinetic phenomena in these rocks are suppressed. The seismoelectric effect and electroosmotic phenomena occur only in the rocks with imperfect bonding between the components (rocks with low, medium and partially high permeability (except clays)) with the pore radius of  $1 \cdot 10^{-6} - n \cdot 10^{-4}$  m. The effects of induced polarization distort TEM signals and can be detected only at the values of the induced polarization decay constant of  $\sim 1 \mu s - n$  ms.

**Keywords:** electrokinetic phenomena, seismoelectric effect, electro-osmosis, pore radius, component bonding

**For citation:** Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu. Rock classification according to seismo-electric and electrokinetic effect occurrence. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):262-279. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-262-279>. EDN: FJKFMC.

## Введение

Сейсмоэлектрический эффект (СЭЭ) относится к разряду электрокинетических явлений. К вопросу использования сейсмического источника для возбуждения электромагнитного поля в земле возвращались спорадически начиная с конца 30-х годов XX века. В 1939 и 1940 годах А.Г. Иванов [1, 2] опубликовал данные измерений СЭЭ в осадочных отложениях и предположил электрокинетический механизм взаимодействия. Он использовал термин «сейсмоэлектрический эффект второго рода», или «Е-эффект», чтобы уточнить, что речь идет о наблюдениях изменения электрического сопротивления под воздействием сейсмического удара. Со времен Иванова было опубликовано несколько работ о полевых измерениях СЭЭ [3] и его связи с электрокинетическими явлениями.

В научной литературе регулярно возникает вопрос, в каких средах возникает СЭЭ. Вся теория электрокинетических зондирований основана на факте возникновения электрокинетического эффекта в водонасыщенных пористых породах. С.Т. Мартнер и Н.Р. Спаркс [4] продемонстрировали чистый СЭЭ, возникающий в выветрелых породах. Р.А. Бродинг с соавторами [5] измерил сигнал вдоль профиля в скважине и установил, что максимум электрического сигнала приходится на границу «песчаные суглинки/сланцы». Скважинные измерения, проведенные Э.И. Пархоменко и И.В. Гаскаровым [6], показали, что сейсмоэлектрический сигнал в известняках значительно сильнее, чем в глинах. Н.И. Мигунов установил [7], что электрический сигнал возникает, когда сейсмическая волна пересекает границу кимберлитовой трубки. Дж. Нив и Ф.Р. Йаттс [8] описали возникновение СЭЭ в водонасыщенных средах. М. Максвелл с соавторами [9]

обнаружил, что пьезоэлектрический эффект от кварца дополняется иным сигналом, возникающим во вмещающих кварц породах. Большой объем полевых экспериментов провели А.Х. Томпсон и Г.А. Гист [10]. Они доказали, что способны зарегистрировать сейсмоэлектрический сигнал с границы между непроницаемыми породами и проницаемыми обводненными песками с глубин по крайней мере 300 м. К.Е. Батлер с соавторами [11, 12] доказал, что, когда сейсмическая волна пересекает границу между непроницаемыми ледниковыми отложениями и проницаемыми богатыми органическими веществами илами, возникает электрическое поле, которое регистрируется на поверхности заземленными электрическими диполями. Работа О.В. Михайлова с соавторами [13] показала, что СЭЭ в пористых водонасыщенных породах может быть обнаружен в полевых условиях, объяснен и промоделирован математически. Эти же авторы [14] провели измерения в скважине и обнаружили трещинные (проницаемые) зоны, выполнили сейсмоэлектрические измерения в скважине, показали и доказали возможность выявления проницаемых трещинных зон. Однако исследователями описаны случаи возникновения электрокинетического эффекта в плохо проницаемых глинах [15] и его отсутствие в обводненных песках [16]. Возбуждая среду вибросейсмическими импульсами и одновременно проводя электрический коротаж в скважине, Б.С. Светов с соавторами [17] продемонстрировал некоторое увеличение сейсмоэлектрического сигнала в интервале развития наиболее плотных мелкопористых карбонатных образований. Значительно меньшее уменьшение электрического сигнала отмечено в породах, содержащих терригенные пропластки. Д.А. Алексеев с соавторами [18]



провел численное моделирование сейсмозлектрических полей, возбуждаемых импульсными сейсмическими источниками в пористых средах. В течение последнего десятилетия китайская компания Seismo Electronics LLS специализируется на создании аппаратуры для сейсмозлектрических зондирований и проведении работ для поисков подземных вод.

К разряду электрокинетических явлений относится также эффект вызванной поляризации электроосмотического типа, который часто регистрируется при работах методом становления поля главным образом в высокоомных средах. Этот эффект осложняет сигналы становления поля, вплоть до двойного изменения знака, что существенно затрудняет интерпретацию полученных данных. Обнаруженный впервые в начале 1980-х годов [19–20] эффект достаточно хорошо описан, изучен как физический феномен и промоделирован различными математическими моделями вызванной поляризации [21–24]<sup>1</sup>. Однако до сих пор остается вопрос, в каких породах этот эффект достигает максимальной амплитуды и в каких породах его не удастся зарегистрировать.

В первую очередь это определяется перспективами метода становления поля для поиска и оконтуривания углеводородосодержащих компонентов, а также гидрогеологических и геоэкологических целей.

Ф. Гассман [25] приводит классификацию горных пород по связям между компонентами, слагающими горные породы. Наша задача – математически обосновать эти соотношения и определить группы пород, в которых сейсмозлектрические и электрокинетические эффекты могут быть обнаружены, и обеспечить дополнительную информацию о геоэлектрических и гидрогеологических параметрах пород и геологическом строении разреза.

### Материалы и методы исследования

*Классификация пород по типам связей между слагающими их компонентами.* При распространении электромагнитного поля в земле возникают электрические токи, под действием которых жидкость в порах начинает

передвигаться относительно твердой фазы. При включении тока часть ионов рыхлой части двойных электрических слоев (ДЭС), увлекаемая электрическим током, отрывается от своего положения, образуя течение жидкости, возникает электродвижущая сила поляризации, направленная противоположно течению электрического тока в порах, то есть возникает электроосмотический эффект. При ступенчатом выключении тока процессы в ДЭС и поровом пространстве пород идут в обратном порядке, и порода возвращается в статическое состояние. Тот же эффект наблюдается, если к концам поры приложить градиент давления (потенциалы течения):

$$E = \frac{\varepsilon_{\text{отн}} \varepsilon_0 \zeta}{4\pi\sigma_f v_d} \text{grad}P, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\text{grad}P$  ( $\Delta P$ ) – разность потенциалов на концах капилляра, Па/м). Градиентом давления, в частности, может служить как разность альтитуд между поровыми каналами в породе, (например, на склонах холмов или гор, где в естественном состоянии возникают фильтрационные поля), так и распространяющаяся сейсмическая волна, генерирующая СЭЭ.

Нижеприведенная выдержка позаимствована из учебного пособия В.Н. Кобрановой<sup>2</sup>. Как известно, горные породы в большинстве случаев являются агрегатами, компоненты которых обладают различной упругостью. Специфическую упругость имеет также скелет породы. Он занимает в пространстве тот же объем, что и вся среда в целом. В его межзерновых цементосодержащих и сообщающихся друг с другом порах находится жидкий или газовый наполнитель (или оба этих компонента) пород. Иногда жидкий и газовый наполнитель практически неподвижен в порах. Он не может циркулировать через поры под воздействием тех незначительных и переменных напряжений, которые возникают при прохождении в породе волн упругости. В поровое пространство такой породы не поступает извне жидкий наполнитель порового пространства. Малые и переменные во времени изменения напряжения в породах от акустических волн не вызывают необратимых деформаций. Деформации пропорциональны напряжениям, а потери

<sup>1</sup> Агеев В.В. Математическое моделирование электромагнитных зондирований поляризующихся сред и проблема высокоразрешающей электроразведки: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 04.00.12. М., 1997. 18 с

<sup>2</sup> Кобранова В.Н. Петрофизика: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 392 с.



энергии и наблюдаемые изменения пористых пород весьма близки к тем же деформациям для идеально упругих сред. Поры этих пород считаются закрытыми. Следуя работе В.Н. Кобрановой<sup>2</sup>, эти породы будем считать дифференциально упругими с «совершенной связью между компонентами». Примерами пород с закрытыми порами могут служить низкопористые и неизменные разности осадочных, метаморфических и магматических пород, глины представляют высокопористые разности этих сред.

В то же время в природе существует множество типов пород, содержащих жидкий и газовый компоненты в объемах, заметно сказывающихся на их упругости с менее прочной межфазной связью. Вследствие различия упругих свойств жидкости и скелета под воздействием упругих деформаций твердый и жидкий компоненты будут перемещаться относительно друг друга, и эти перемещения взаимосвязаны. Изменение давления в скелете и будет определять изменение давления в порах. Эти породы будем считать «породами с несовершенной связью между компонентами» [25]. Изменения напряжений в скелете породы одинаково действуют как на твердую матрицу, так и на поры. К этому типу относятся нефтенасыщенные пески, песчаники, алевролиты, рыхлые известняки и доломиты.

Другой противоположный случай – когда при почти полном отсутствии связи между составляющими заполнитель свободно циркулирует в поровом пространстве и поры хорошо связаны между собой. Незначительные приращения напряжений не изменяют заполнителя порового пространства. В этом случае изменения напряжений действуют лишь на твердое вещество и скелет породы. Такие породы характеризуются отсутствующей связью между компонентами.

На связь между фазами влияют вязкость жидкости и диаметр поровых каналов.

Следует отметить, что в основу классификации по размерам пор положены данные о характере связи поровой жидкости с твердой компонентой и ее передвижения в порах. В сверхкапиллярных порах доля воды, связанной с твердым компонентом, невелика, и основной ее объем движется согласно гидродинамическим законам для труб по направлению силы тяжести. В капиллярных порах содержание связанной воды больше, и ее падению под действием силы тяжести препят-

ствует капиллярный подъем. В субкапиллярных порах природные воды практически неподвижны, они почти нацело прочно связаны с твердым компонентом.

В.Ю. Хальбауэр-Задорожной и Э.Х. Стеттлером [26] было высказано предположение, что в породах с совершенной связью между компонентами градиент давления, обусловленный сейсмической волной, воздействует только на твердую фазу и независимого изменения давления в порах не происходит. В этом случае градиент давления в порах соответствует градиенту давления в скелете породы. Тем не менее, при достаточно высоком значении  $\zeta$ -потенциала СЭЭ может быть зарегистрирован. Авторами также было высказано предположение об отсутствии СЭЭ в породах с отсутствующей связью между компонентами.

*Уравнения для расчета градиента давления, обуславливающего сейсмоэлектрический эффект.* Что касается пород с несовершенной связью между компонентами, то мы полагаем, что в любой точке среды в определенный момент времени прихода сейсмической волны градиент давления одинаково воздействует на твердый скелет и поровое пространство породы. Это означает, что каждая точка среды в момент прихода сейсмической волны, будь то твердая или жидкая фаза, может быть рассмотрена как независимый источник сейсмических колебаний (принцип Гюйгенса). Если в этой точке находится жидкий компонент, то под влиянием градиента давления, обусловленного сейсмической волной, жидкий компонент начнет перемещаться относительно скелета. Подтвердим математически это высказанное предположение и покажем при каких соотношениях петрофизических характеристик породы можно генерировать СЭЭ.

Для расчета градиента давления, обуславливающего СЭЭ, рассмотрим два основных уравнения:

1. Уравнение, описывающее относительное смещение частиц породы, вызванное сейсмической волной.

2. Уравнение установления потенциалов течения в цилиндрической поре, когда градиент давления  $P(t)$  приложен к ее началу.

Если градиент давления переменного типа приложить к среде, возникает сейсмическая волна. Когда сейсмическая волна распространяется в среде, она производит незначитель-



ные обратимые деформации среды – смещение частиц породы. Для сферического источника давления  $P(t)$  с радиусом  $r_0$  уравнение, описывающее смещение частиц в любой точке однородной среды (в м), может быть записано в виде<sup>3</sup>:

$$U_p(r, t) = \left[ \frac{f_s(\tau_1)}{R^2} + \frac{f'_s(\tau_1)}{V_p R} \right] \frac{r_0}{\delta} \vec{r}, \quad (2)$$

где  $V_p$  – скорость распространения продольной  $P$ -волны, м/с,  $\delta$  – плотность пород, кг/м<sup>3</sup>,  $R$  – расстояние между источником возбуждения и точкой наблюдения, м;  $\vec{r}$  – единичный радиус-вектор. Значение  $f_s(\tau_1)$  определяется по спектру давления  $D(\omega)$ :

$$f_s(\tau_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{D(\omega) \cdot \exp(i\omega\tau_1) d\omega}{\omega_{0p}^2 - \omega^2 + 2i\pi\alpha_p},$$

где  $\omega$  – круговая частота ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота, Гц);  $\tau_1 = t - (R - r_0)/V_p$  – время прихода волны в точку наблюдения, с;  $\omega_{0p} = 2V_s/r_0$  – собственная частота колебаний источника, Гц;  $V_s$  – скорость распространения поперечной волны в среде, м/с;  $\alpha_p = 2V_s^2/RV_p$  – коэффициент затухания, с<sup>-1</sup>;  $D(\omega)$  представляет спектр давления и может быть записан в следующем виде:

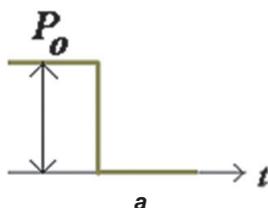
$$D(\omega) = D_s(\omega) \cdot P_0, \quad (3)$$

где  $D_s(\omega)$  – спектр давления;  $P_0$  – амплитуда удара, Н/м<sup>2</sup>.

Давление, возникающее в породах под воздействием сейсмической волны, может быть записано в виде<sup>3</sup>

$$P(R, t) = -K\theta = -K \frac{\partial U}{\partial R},$$

где  $K$  – модуль всестороннего сжатия породы, Па или кг/м·с<sup>2</sup>;  $K = -V \cdot dP/dV$  где  $V$  – объем,  $\theta$  – дилатансия, м/м, которая выражается соотношением



$$\theta = - \frac{\partial U}{\partial R}. \quad (4)$$

Дифференцируя (2) по  $R$ , получаем выражение для давления сейсмической волны в произвольной точке  $R$ :

$$P(R, t) = K \left[ \frac{3f_s(\tau_1)}{R^3} + \frac{f'_s(\tau_1)}{V_p R^2} \right] \frac{r_0}{\delta} \vec{r}. \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по  $R$ , получаем градиент давления, возникающий в среде в точке  $R$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(R, t)}{\partial R} &= \text{grad}P = \\ &= -K \left[ \frac{4f_s(\tau_1)}{R^4} + \frac{2f'_s(\tau_1)}{V_p R^3} \right] \frac{r_0}{\delta} = \text{grad}P_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где индекс «0» означает градиент давления в породах с модулем всестороннего сжатия  $K$  и скоростью распространения сейсмической волны  $V_p$ .

Поскольку мы предположили, что в любой точке среды в определенный момент времени прихода сейсмической волны градиент давления одинаково воздействует как на твердый скелет, так и поровое пространство породы, в какой-то момент времени градиент давления будет приложен к началу любой поры. Таким образом, сначала рассмотрим задачу установления давления в цилиндрической поре при наложении градиента давления в виде ступенчатой функции (функции Хевисайда) к ее началу (рис. 1, а).

Выражение для установления давления в поре имеет вид [27]:

$$\begin{aligned} P_{tr}(l, t) &= P_0 \left[ 1 + \frac{l}{L} - \right. \\ &\left. - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D t}{L^2}\right) \right] = \\ &= P_0 \cdot f_{tr}, \end{aligned} \quad (7)$$

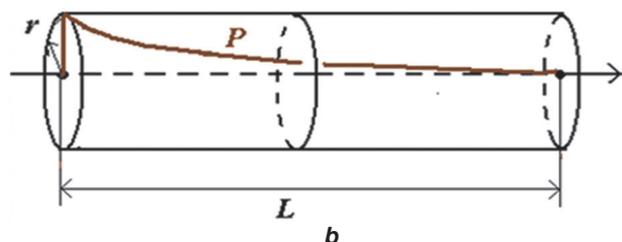


Рис. 1. Градиент давления в виде функции Хевисайда, приложенный к началу цилиндрической поры (а), и установление давления в ней (b)  
 Fig. 1. Pressure gradient in the form of a Heaviside function applied to the beginning of a cylindrical pore (a) and pore transient pressure (b)

<sup>3</sup> Гурвич И.И. Сейсморазведка: учебник для техникумов. М.: Гостоптехиздат, 1960. 504 с.



где  $L$  – длина цилиндрической поры;  $l$  – точка наблюдения внутри поры;  $t$  – время;  $P_0$  – амплитуда ступенчатой функции;  $C_D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с, о котором речь пойдет ниже:

$$f_{tr} = 1 + \frac{l}{L} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D t}{L^2}\right). \quad (7, a)$$

Рассчитаем установление давления в поре, обусловленное градиентом давления от дельта-функции Дирака. Соотношение между функцией Хевисайда и дельта функцией имеет вид:

$$f_{del}(t) = -\frac{\partial f_{tr}(\tau)}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Дифференцируя (7, а) по  $t$ , получим:

$$P_{delT}(l, t) = \frac{2P_0 \pi C_D}{L^2} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D t}{L^2}\right) \right] = P_0 \cdot f_{delT}, \quad (9)$$

где

$$f_{delT} = -\frac{2\pi C_D}{L^2} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D t}{L^2}\right) \right]. \quad (10)$$

Чтобы получить выражение для установления давления в цилиндрической поре, обусловленного приходом сейсмической волны, необходимо осуществить конволюцию функции градиента давления, вызванного сейсмической волной  $gradP$  (4) с выражением для установления давления в поре от дельта-импульса давления  $f_{delT}$  (10):

$$gradP_S(t) = \int_0^t gradP_0(t - \tau) f_{delT}(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Однако в пористой проницаемой среде все поры переплетаются между собой, и каждая точка в любой поре в определенный момент времени может быть рассмотрена как начало поры. Введем понятие «удельной» поры, то есть поры определенной длины, вдоль которой производится интегрирование. Это пора длиной  $L$ , то есть на удалении  $L$  давление, обусловленное функцией Хевисайда, спадает до нулевого значения (рис. 1, б). Введем прямоугольную систему координат, где  $x_{00}$  и  $x_0$  – координаты начала и конца поры соответственно, а  $l$  – точка наблюдения внутри поры (рис. 2). Таким образом, с момента времени  $t_1$ , когда сейсмическая волна приходит в точку  $x_{00}$ , начи-

нается установление давления по длине всей поры  $L$ . В момент времени  $t_l$  волна приходит в точку  $x_{00} + l$  и вновь устанавливается давление по длине поры  $L$  (сдвинутой на расстояние  $l - x_{00}$ ) по отношению к выше рассмотренной поре. Тогда в точке  $x_{00}$  произойдет суперпозиция давлений, обусловленных распространением сейсмической волны в поре  $L$ , каждая точка которой в определенный момент времени является начальной в поре  $L_0$  (см. рис. 2).

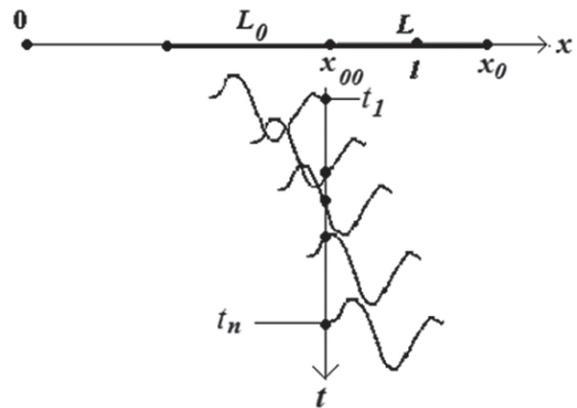


Рис. 2. Распространение сейсмической волны и координаты, объясняющие конволюцию функций (8) и (11)

Fig. 2. Seismic wave propagation and coordinates explaining the convolution of functions (8) and (11)

Таким образом, чтобы получить установление давления в точке порового пространства породы, обусловленного проходящей через нее сейсмической волной, необходимо произвести конволюцию установления давления в поре, обусловленного сейсмической волной  $gradP_S$  (8) и дельта-функций установления давления в поре (по  $l$ )  $f_{delL}$  (11), то есть:

$$gradP = \int_0^L gradP_S(x_{00} + L - l, t) * \frac{\partial f_{tr}}{\partial l} dl = \int_0^L gradP_S(x_{00} + L - l, t) f_{delL}(l, t) dl, \quad (12)$$

где

$$f_{delL}(l, t) = -\frac{\partial f_{tr}(l, t)}{\partial l} = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} n \cos\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D t}{L^2}\right). \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой установление давления от дельта-функции (по  $l$ ) в точке наблюдения  $l$ . Таким образом, выражение (12) описывает градиент давления в точке пористой среды  $l$ , возникающего при прохождении сквозь нее сейсмической волны.



Вернемся к вопросу о коэффициенте диффузии  $C_D$ . В научной литературе практически не приводится оценок величины этого параметра. Согласно теории, описанной в источнике [28], медленные сейсмические волны представляют собой движение жидкости относительно твердой матрицы, и в волновом уравнении следует учитывать электрокинетический эффект. В этом случае уравнение для волны имеет вид, который и включает коэффициент диффузии  $C_D$  [28]:

$$\frac{PR - Q^2}{b(P + R + 2Q)} \nabla(\nabla\xi) - \frac{\partial\xi}{\partial t} = C_D \nabla(\nabla\xi) - \frac{\partial\xi}{\partial t} = 0, \quad (14)$$

здесь  $P, Q$  и  $R$  – феноменологические константы упругости, предложенные М. Био;  $\xi = u - U$  – относительное перемещение твердой матрицы и жидкости, где  $u$  и  $U$  – средние смещения матрицы и флюида соответственно;  $C_D = PR - Q^2/b(P + R + 2Q)$ .

Р.Н. Чандлером и Д.Л. Джонсоном [29] было получено выражение, представляющее коэффициент диффузии  $C_D$  как комбинацию петрофизических (структурных, гидродинамических и упругих) параметров:

$$C_D = \frac{k_p K_f}{\eta_d \varphi} \left\{ 1 + \frac{K_f}{\varphi \left( K_b + \frac{4}{3} G \right)} \left( 1 + \frac{1}{K_s} \left[ \frac{4}{3} \left( 1 - K_b - \varphi \left( K_b + \frac{4}{3} G \right) \right) \right] \right)^{-1} \right\}, \quad (15)$$

где  $K_f, K_b$  и  $K_s$  – модули всестороннего сжатия жидкости, твердой фазы и скелета породы соответственно, Па или Н/м<sup>2</sup>;  $G$  – модуль сдвига скелета, Па или Н/м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – пористость скелета породы;  $k_p$  – коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;  $\eta_d$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с или кг·с/м<sup>2</sup>. При  $K_b, K_s \gg K_f$  выражение (15) сводится к виду:

$$C_D \approx \frac{k_p K_f}{\eta_d \varphi_d}. \quad (16)$$

Между проницаемостью  $k_p$  и динамической пористостью  $\varphi_d$  существует прямая зависимость, которая для пород с изменяющимся сечением пор может быть записана в виде (модель Козени – Кармана) [29]:

$$k_p = \frac{\varphi_d^3}{S_{FV}^2 T_H^2 f}. \quad (17)$$

Подставив (17) в (16), получим:

$$C_D = \frac{\varphi_d^3}{S_{FV}^2 T_H^2 f} \frac{K_f}{\varphi \eta_d},$$

где  $T_H$  – гидравлическая извилистость (безразмерная величина);  $f$  – постоянная Козени (безразмерная величина);  $S_{FV}$  – удельной поверхности фильтрующего канала, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Таким образом, для высокопористых пород с изменяющимся сечением пор и для случаев, когда ДЭС в порах неразвиты, и объемом связанной воды в породе можно пренебречь, величина  $C_D$  прямо пропорциональна квадрату пористости и обратно пропорциональна квадратам гидравлической извилистости и удельной поверхности фильтрующего канала. В случае, когда породы содержат в своем объеме связанную воду, с учетом  $\tau_{av} S_{FV} = k_{aw} \varphi$ ,  $S_{FV}^2 = k_{aw}^2 \varphi^2 / \tau_{av}^2$  и  $\varphi_d = \varphi (1 - k_{aw})$ , параметр проницаемости имеет вид<sup>1</sup>:

$$k_p = \frac{(1 - k_{aw})^3 \varphi}{k_{aw}^2 \left( \frac{T_H}{\tau_{av}} \right)^2 f}, \quad (18)$$

где  $\tau_{av}$  и  $k_{aw}$  – толщина пленки связанной воды, м и ее содержание в породе;  $k_{aw} = V_{aw}/V_{pore}$ , то есть отношение объема, занимаемого пленками связанной воды к общему объему порового пространства породы. Подставив (18) в (16), получим:

$$C_D = \frac{(1 - k_{aw})^3}{k_{aw}^2 \left( \frac{T_H}{\tau_{av}} \right)^2 f} \cdot \frac{K_f}{\eta_d \cdot \varphi} = \frac{(1 - k_{aw})^3}{k_{aw}^2 \left( \frac{T_H}{\tau_{av}} \right)^2 f} \cdot \frac{K_f}{\eta_d}. \quad (19)$$

Таким образом, коэффициент диффузии  $C_D$  включает электрокинетические параметры  $k_{aw}$  и  $\tau_{av}$ . Формула (17) показывает, что  $C_D$  прямо пропорционален квадрату толщины пленки  $\tau_{av}$  и обратно пропорционален объему этой пленки в единице объема пород.

**$C_D$  и фрактальная модель пород.** Для оценки коэффициента диффузии  $C_D$  используем фрактальную модель пород [30]<sup>2</sup>. Объем пленки связанной воды зависит как от пористости среды, так и от размеров зерен, слагающих породу. Бикомпонентная, то есть двухфазная порода, состоит из двух фаз: твердой (матрица) и жидкой (вода в порах). В модели Семенова–Овчинникова матрица состоит из  $n$  сфер (или эллипсоидов) одинакового размера и пригодна для описания хорошо отсортированных песков и биогермных языков. Удельное сопротивление матрицы очень велико, а вторым компонентом модели является вода с удельным сопротивлением  $\rho_f$ . Рассмотрим случай для одной единицы среды – куба размером  $L = 1$ , и включим в этот куб сферу с радиусом  $r_1 = L/2 = 0,5$



(рис. 3, а). Объем этой сферы –  $V_1$ . Этот шар будем считать основным зерном (зерном первой фракции).

Примем, что после заполнения объема породы  $V_1$  серией самых крупных включений  $\varphi_0 = (1 - V_1) = 0,4763$  остался объем  $(1 - \varphi_0)$ , который в свою очередь, составляет долю серией более мелких включений. Таким образом, вторая фракция включений располагается на углах куба, то есть число зерен второго порядка, приходящегося на рассматриваемый объем, равно восьми (рис. 3, б). Однако они лишь частично включены в единичный объем, и эта фракция будет занимать объем  $V_2 = (1 - \varphi_0) \cdot \varphi_0 = 0,2494$ . Следующая фракция сферических включений, состоящая из сфер еще более мелкого радиуса, будет составлять объем  $V_3 = (1 - \varphi_0)^2 \cdot \varphi_0 = 0,227$ . Зерна данной фракции размещаются на углах куба, в которой вписываются зерна второго порядка. Таким образом, число зерен третьего порядка на восьми кубах второго порядка равно восьми. Радиус зерен второго порядка  $r_2$  будет равен 0,3905.

Третья фракция занимает объем  $V_3 = (1 - \varphi_0)^2 \cdot \varphi_0 = 0,1188$ , а общий объем твердой фазы такой модели  $V_{1+2+3} = 0,8918$ . Радиус сферических зерен третьего порядка  $r_3 = 0,1503$ . Продолжая таким образом, можно рассчитать размер зерен каждой фракции и объем порового пространства породы.

Оставшийся объем  $(1 - \varphi_0)^n$  будет равен коэффициенту пористости модели среды  $\varphi$ . Очевидно, что коэффициент пористости  $\varphi$  модели среды будет определяться числом фракций сферических включений  $n$ . Сопrotивление такой модели равно:

$$\rho_p = \left( \frac{3 - \varphi_0}{2\varphi_0} \right)^{\lg \varphi / \lg \varphi_0} \rho_f.$$

В том случае, когда зерно покрыто пленкой связанной воды толщиной  $\tau_{av}$ , динамическая пористость отличается от общей пористости скелета породы. Рассчитаем содержание связанной воды в породе  $k_{aw}$  как разность между объемом зерен, покрытых пленкой связанной воды  $V_{S+\tau}$  и объемом твердой фазы  $V_S$  относительно общей пористости породы, то есть  $k_{aw} = (V_{S+\tau} - V_S)/\varphi$  и, подставив  $k_{aw}$  (при толщине пленки связанной воды  $\tau_{av} = 10^{-9}$  м) в (19), получим значения  $C_D$ . Очевидно, что чем меньше зерна, слагающего породу, тем больший вклад вносит объем связанной воды и тем меньше  $C_D$ . На рис. 4 показана серия кривых, демонстрирующих зависимость  $C_D$  от проницаемости пород при различных размерах зерен первого порядка, что определяет гранулометрический состав реальных геологических пород. На рисунке указана группа пород по проницаемости<sup>1</sup>. Расчеты показывают, что для очень высокопористых пород коэффициент диффузии  $C_D$  может варьироваться в интервале 500–1000 м<sup>2</sup>/с и более. При заполнении межпорового пространства серией мелких включений проницаемость породы уменьшается и соответственно  $C_D$  уменьшается прямо пропорционально этому параметру (19). Для высокопористых пород коэффициент  $C_D$  может принимать значения 70–1000 м<sup>2</sup>/с, для среднепроницаемых –  $C_D \sim 8$ –200 м<sup>2</sup>/с. Для низкопроницаемых пород  $C_D$  изменяется в пределах 0,8–15 м<sup>2</sup>/с. Следовательно, вполне допустимо предположение, если  $C_D < 0,5$ , то такие породы классифицируются как породы с совершенной связью

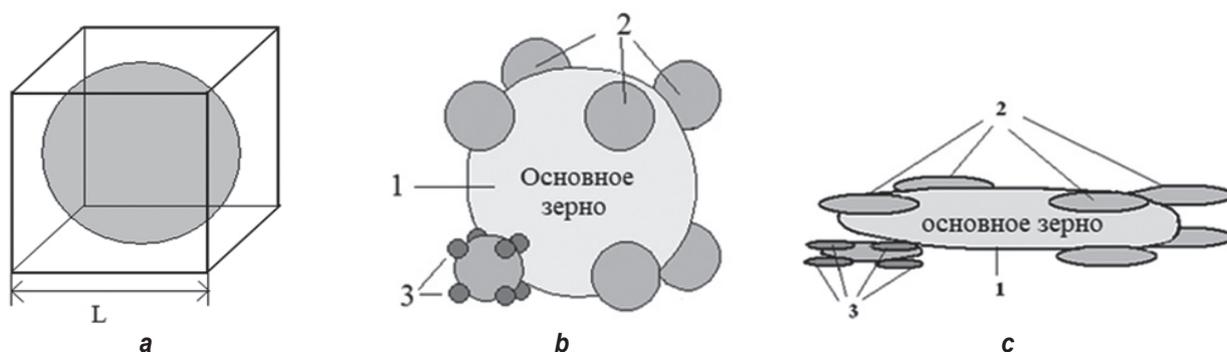
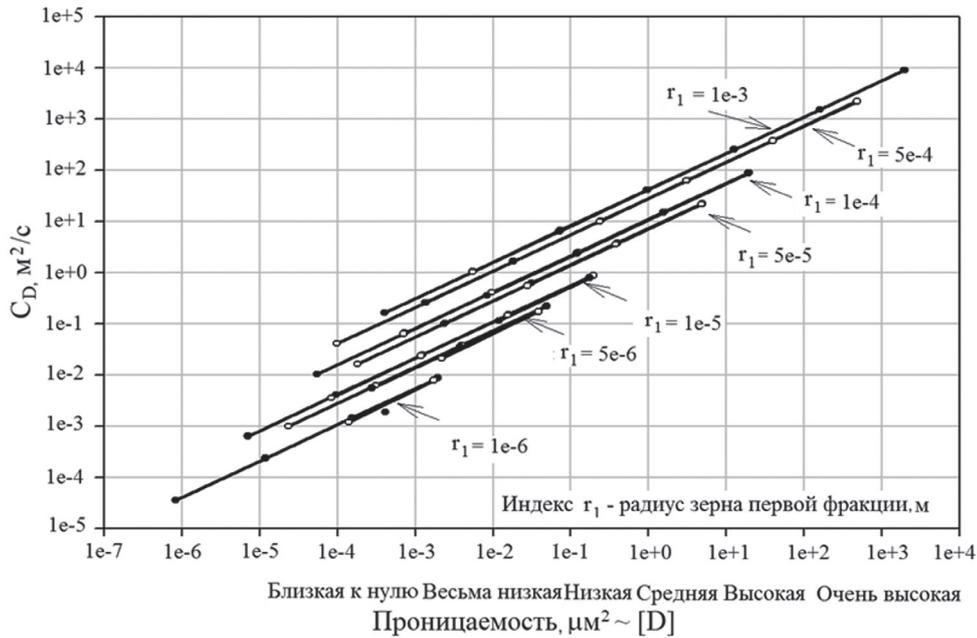


Рис. 3. Фрактальная модель обломочных отложений, содержащая шары и эллипсы разного диаметра: зерно первого порядка в единичном объеме (а); расположение зерен высших порядков в шаровой (б) и эллипсоидной (с) моделях

Fig. 3. Fractal model of clastic sediments containing spheres and ellipses of different diameters: first order grain in a unit volume (a); arrangement of higher-order grains in the sphere (b) and ellipsoid (c) models

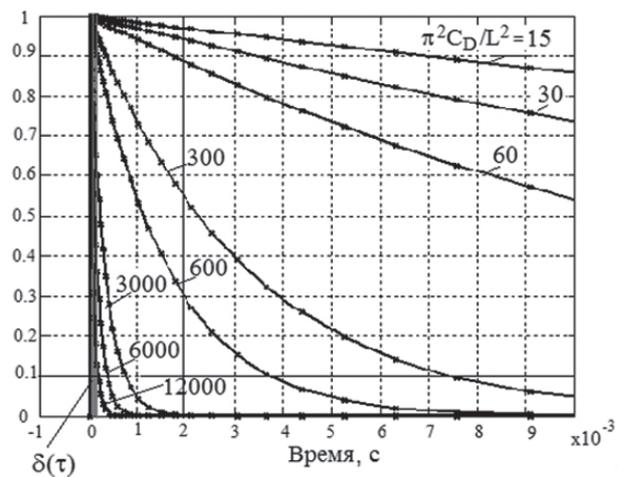


**Рис. 4. Зависимость коэффициента диффузии  $C_D$  от проницаемости пород для фрактальной модели пород, представленной зернами различного размера**  
**Fig. 4. Diffusion coefficient  $C_D$  vs rock permeability for a rock fractal model represented by grains of different sizes**

между компонентами и градиент давления, возникающий в таких породах при прохождении сейсмической волны, рассчитывается по формуле (2). Если  $C_D > 1000$ , то в соответствии с высказанным предположением об отсутствии СЭЭ в породах с отсутствующей связью между компонентами, градиент давления принимается равным нулю. Во всех остальных случаях градиент давления вычисляется по формуле (9).

*Предельные случаи. Коэффициент диффузии для коротких и длинных пор.* Очевидно, что СЭЭ прямо пропорционально зависит от скорости распространения сейсмических волн и плотности пород (6), электрического сопротивления и динамической вязкости флюида, заполняющего поровое пространство среды (1). Однако все эти перечисленные параметры в конечном счете зависят от пористости и проницаемости среды, то есть являются производными структуры порового пространства среды. В соответствии с формулами (8–11), параметрами, определяющими поровое пространство среды, являются коэффициент  $C_D$  (связанный с проницаемостью и пористостью среды), средняя длина пор в породе  $L$  и коэффициент потенциала течения  $\zeta$  (1). Рассмотрим предельные случаи возникновения СЭЭ в породах с различными связями

между компонентами. Заметим, что в выражении (7) стоит функция  $\exp(-n^2\pi^2C_D t/L^2)$ , которая равна единице при  $t = 0$  и быстро убывает со временем (размерность  $C_D/L^2$  равна  $1/t$ ). Форма спада экспоненты зависит от соотношения  $n^2\pi^2C_D/L^2$  (рис. 5). Рассмотрим случаи, когда  $\beta = \pi^2C_D/L^2 \gg 1$ , полагая, что поры  $L$  могут быть как длинными, так и короткими, а также случай  $\beta \sim 1$ .



**Рис. 5. Зависимость параметра  $\exp(-n^2\pi^2C_D t/L^2)$  от времени  $t$  для различных значений  $\beta = \pi^2C_D/L^2$**   
**Fig. 5. Dependence of  $\exp(-n^2\pi^2C_D t/L^2)$  parameter on time  $t$  for different  $\beta = \pi^2C_D/L^2$  ratios**



В случае, когда  $\beta \gg 1$ , экспоненциальная функция по форме будет близка к дельте-функции Дирака  $\delta(\tau)$  (см. рис. 5) и свертка функции с дельта-функцией равна самой функции. При  $\beta \gg 1$  экспоненциальная функция быстро убывает, а ее амплитуда при  $t \rightarrow 0$  равна единице. Таким образом, можно записать:

$$\frac{\exp(-\beta t)}{\Delta t} \sim \delta(t). \quad (20)$$

Рассмотрим выражение  $\exp(-n^2\pi^2 C_D \tau / L^2)$  и ее производную по  $\tau$ :  $-n^2\pi^2 C_D / L^2 \exp \tau$ . Обозначим  $n^2\pi^2 C_D / L^2$ ,  $R = 2\pi n C_D / L^2$ , тогда  $K = Rn\pi/2$ . Очевидно, что при  $\tau = \Delta t_n = 1/nR$  получим:  $\exp(-K\tau) = \exp(-Rn\pi\tau/2) = \exp(-\pi/2)$ . Таким образом, при любом  $\Delta t_n = L^2/2\pi n^2 C_D$  экспонента  $\exp(-\pi/2) = 0,2079$ . Таким образом, при любом значении  $\Delta t_n = L^2/2\pi n^2 C_D = \Delta t_1/n$  экспонента резко спадает, при этом площадь этой экспоненциальной функции будет близка к единице и аппроксимация ее дельта-функцией вполне оправдана.

Приняв во внимание (20), при  $\tau = \Delta t_1$  для любого  $n$ , выражение (11) запишем в виде:

$$\begin{aligned} gradP_S(t) &= \int_0^e gradP_0(-\tau) f_{delT}(\tau) \cdot d\tau = \\ &= -\frac{2\pi C_D}{L^2} \int_0^e gradP_0(t-\tau) \times \\ &\times \left[ \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2\pi^2 C_D \tau}{L^2}\right) \right] d\tau \approx \\ &\approx -\frac{2\pi C_D}{L^2} \Delta t_n \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) gradP_0. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким образом, при  $\tau = \Delta t_1$  для любого  $n$  получим:

$$\begin{aligned} gradP_S(t) &\approx -\frac{2\pi C_D \Delta t_1}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{\pi n l}{L}\right) \times \\ &\times \int_0^t gradP_0(t-\tau) \frac{n\delta(\tau)}{\Delta t_1} d\tau = \\ &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} gradP_0 \approx 0.45 gradP_0. \end{aligned} \quad (22)$$

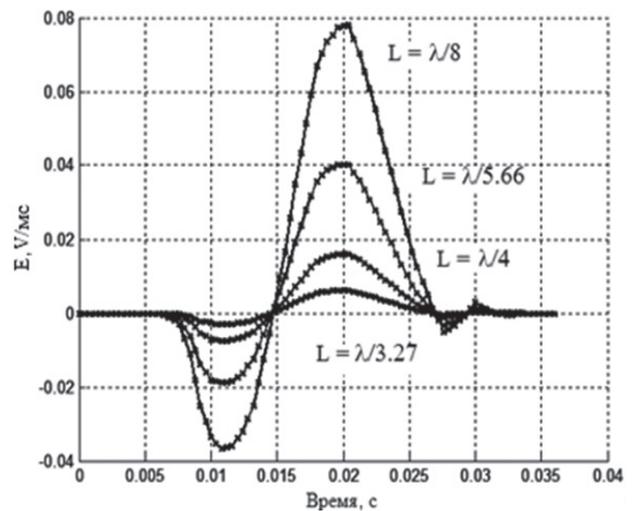
Приближение (22) справедливо для коротких пор, примером которых могут служить глины. Из практики известно, что в глинах затухание акустических сигналов также происходит быстро.

## Результаты исследования и их обсуждение

При том же самом соотношении  $\pi^2 C_D / L^2$  существуют два предельных варианта: длина поры  $L$  может быть как длинной, так и короткой. Рассмотрим оба случая. Запишем выражение (9) в виде:

$$\begin{aligned} gradP &= \int_0^L gradP_S(x_{00} + L - l, t) \frac{\partial f_{tr}}{\partial l} dl = \\ &= \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \int_0^L \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) gradP_0(x_{00} + L - l, t) dl + \\ &\quad + \exp\left(-\frac{n^2\pi^2 C_D t}{L^2}\right) \times \\ &\times \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^L \sin\left(\frac{2n\pi l}{L}\right) gradP_0(x_{00} + L - l, t) dl. \end{aligned} \quad (23)$$

Рассмотрим случай  $\pi^2 C_D / L^2 \gg 1$  (поры длинные, и  $C_D$  очень велико) (рис. 6). В данном случае показатель экспоненты в формуле (23)  $n^2\pi^2 C_D / L^2 \gg 200$ , и уже на ранних временах экспонента быстро стремится к нулю, и следовательно второе слагаемое выражения (29) быстро стремится к нулю. Первое слагаемое затухает значительно медленнее. Важно, что в рассматриваемом



**Рис. 6. Зависимость сейсмoeлектрического эффекта от длины поры  $L$ :**

$\pi^2 C_D / L^2 = 15000 \text{ с}^{-1}$  ( $\lambda$  – длина сейсмической волны в слое при скорости ее распространения

$V_p = 400 \text{ м/с}$ ;  $x_1 = 3,5 \text{ м}$ ,  $x_2 = 4,5 \text{ м}$  –

положение приемных электродов на профиле относительно пункта возбуждения)

**Fig. 6. Seismoelectric effect vs pore length  $L$ :**

$\pi^2 C_D / L^2 = 15000 \text{ с}^{-1}$  ( $\lambda$  – length of the seismic wave in a layer with the propagation velocity of  $V_p = 400 \text{ м/с}$ ;

$x_1 = 3.5 \text{ м}$ ,  $x_2 = 4.5 \text{ м}$  – position of receiving electrodes on the profile relative to the shotpoint)



случае (величина градиента давления, возникающего в пористых породах обратно пропорционально длине поры. Таким образом, в высокопроницаемых породах с достаточно длинными порами, примером которых могут быть промытые галечники, крупнозернистые пески или коралловые известняк, СЭЭ не возникает, из рисунка 6 следует, что амплитуда СЭЭ мала и убывает с увеличением длины поры. Этот случай экспериментально зарегистрирован В.В. Агеевым<sup>1</sup>. Автор показал, что СЭЭ исчезает на границе осадочных пород и развития крупнозернистых песков, то есть при том же соотношении  $\pi^2 C_D / L^2 \gg 200$  СЭЭ, возникающий в длинных порах, будет в  $L$  раз меньше, чем СЭЭ, возникающее в коротких порах.

Результаты расчетов показаны на рис. 7. При расчетах использовалась программа вычисления СЭЭ в многослойных разрезах, ядром которой является описанный выше алгоритм расчета СЭЭ в пористых средах. Отметим, что на рис. 7–9 амплитуда СЭЭ дана в нормализованном виде.

Однако такая зависимость отсутствует, когда  $\pi^2 C_D / L^2 \gg 1$ , то есть поры длинные, но  $C_D$  гораздо меньше, чем в первом рассматриваемом случае. Тогда экспонента (см. рис. 5) спадает более плавно и не может быть аппроксимирована дельта-функцией. Из рис. 7 следует, что СЭЭ значительно (более чем в

10 раз) увеличивается с длиной поры при меньших значениях  $C_D$  (меньшей проницаемости при той же длине пор). Высокие значения СЭЭ в данном примере обусловлены тем, что рассматривается среда с несовершенной вязью между компонентами. С уменьшением длины поры СЭЭ уменьшается.

Рассмотрим противоположный случай, когда поры в породах чрезвычайно короткие, то есть  $L = 2dl$ , и тогда единственной точкой, в которой производится свертка, это  $l = L/2$ . Очевидно, что и в случае  $l = 0$  и в случае  $l = L$  оба члена выражения (23) равны нулю. Тогда имеем:

$$\begin{aligned} gradP &= \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \int_0^L \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) gradP_0(x_{00} + L - l, t) dl + \\ &+ \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^L \sin(n\pi) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D t}{L^2}\right) \times \\ &\times gradP_0(x_{00} + L - l, t) dl = \\ &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} gradP_0 \approx 0.75 \cdot \frac{2}{\pi} gradP_0 \approx \\ &\approx 0.45 gradP. \end{aligned}$$

Таким образом, СЭЭ, возникающий в породах с совершенной связью между компонентами (породы с вкрапленной пористостью, глины с заблокированными поровыми каналами, сланцами при прохождении тока перпендикулярно напластованию), определяется давлением, оказываемым на матри-

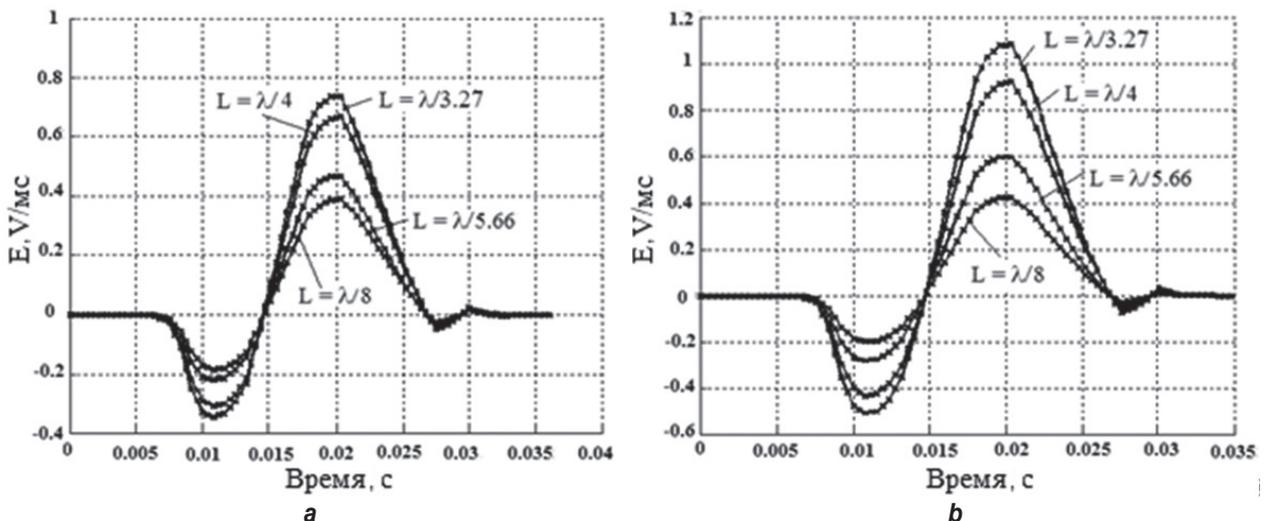


Рис. 7. Зависимость сейсмoeлектрического эффекта от длины поры  $L$ :

$a - \pi^2 C_D / L^2 = 150 \text{ c}^{-1}$ ;  $b - \pi^2 C_D / L^2 = 15 \text{ c}^{-1}$

$\lambda$  – длина сейсмической волны в слое при скорости ее распространения  $V_p = 400 \text{ м/с}$ ;  
 $x_1 = 3,5 \text{ м}$ ,  $x_2 = 4,5 \text{ м}$  – положение приемных электродов на профиле относительно пункта возбуждения

Fig. 7. Seismoelectric effect vs pore length  $L$ :

$a - \pi^2 C_D / L^2 = 150 \text{ c}^{-1}$ ;  $b - \pi^2 C_D / L^2 = 15 \text{ c}^{-1}$

$\lambda$  – length of the seismic wave in a layer with the propagation velocity of  $V_p = 400 \text{ м/с}$ ;  
 $x_1 = 3.5 \text{ м}$ ,  $x_2 = 4.5 \text{ м}$  – position of receiving electrodes on the profile relative to the shotpoint



цу породы проходящей сейсмической волной.

Другой предельный случай  $\beta = \pi^2 C_D / L^2 \ll 1$  (например,  $C_D$  мало, плохо проницаемые породы). В этом случае  $f_{delT}$  будет близка к функции Хевисайда  $f_{step}$ , (см. рис. 5), то есть имеет вид:

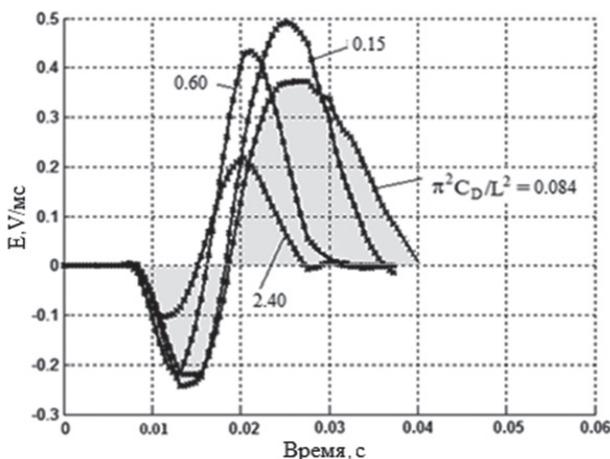
$$\begin{aligned} f_{step}(t < 0) &= 0, \quad \frac{df_{step}(t)}{dt} = f_{delT}, \\ f_{step}(t \geq 0) &= 1. \end{aligned}$$

В таком случае выражение (22) сводится к виду:

$$\begin{aligned} grad P_s(t) &= -\frac{2\pi C_D}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) \times \\ &\times \int_0^t grad P_0(t-\tau) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_D \tau}{L^2}\right) \cdot d\tau = \\ &= -\frac{2\pi C_D}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) \int_0^t grad P_0 f_{step} dt = \\ &= -\frac{2\pi C_D t}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) grad P_0. \end{aligned} \quad (24)$$

То есть в этом случае градиент давления будет линейно зависеть от времени. Для соблюдения данного предельного случая ( $\beta = \pi^2 C_D / L^2 \rightarrow 0$ ) при коротких порах величина параметра диффузии  $C_D$  должна быть чрезвычайно малой (плохо проницаемые породы) и, будучи подставлено в (24), обращает это выражение в нуль.

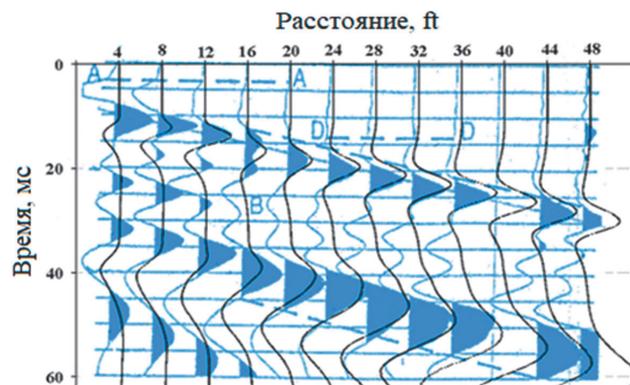
В случае же достаточно длинных пор в слабо проницаемых породах  $\beta = \pi^2 C_D / L^2 \sim 1$  возникает электрокинетический эффект, амплитуда которого невысока, а форма импульса будет вытянута по временной оси (рис. 8).



**Рис. 8. Рассчитанные сейсмoeлектрические сигналы для невысоких значений  $\pi^2 C_D / L^2 \sim 1$**   
**Fig. 8. Calculated seismoelectric signals for low values of  $\pi^2 C_D / L^2 \sim 1$**

Высокие амплитуды сигналов на приведенных рисунках объясняются тем, что сейсмоприемники расположены в непосредственной близости от источника возбуждения (3,5–4,5 м). С удалением от источника амплитуда СЭЭ быстро затухает.

На рис. 9 показан пример сопоставления результатов математического моделирования, проведенного с использованием вышеописанного алгоритма с полевыми данными, полученными О.В. Михайловым и др. [13]. Эксперименты проводились для изучения верхней части разреза. Рисунок показывает работоспособность предложенного алгоритма расчета СЭЭ.



**Рис. 9. Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта в многослойном разрезе:**

синий цвет – полевые кривые, черный – результаты математического моделирования

**Fig. 9. Mathematical modeling of seismoelectric effect in a multilayer section:**

blue color – field curves, black color – results of mathematical modeling

В заключение приведем табл. 1, в которой обобщим полученные результаты и выскажем предположения о типах пород в их соотношении с возможностью возникновения в них СЭЭ.

Согласно классификации<sup>1</sup>, проницаемость глин близка к нулю ( $> 0,01 \mu m^2$ ). При этом именно эти породы могут характеризоваться очень высоким значением  $\zeta$ -потенциала, а также только глины содержат в своем объеме связанную воду в объемах, заметно сказывающихся на их физических свойствах.

**Электроосмос в методе становления поля.** Как указано выше, эффекты вызванной поляризации в методе становления поля могут быть связаны с электроосмотическими явлениями, то есть под действием приложенного электрического поля жидкость в порах на-



Таблица 1. Классификация горных пород с точки зрения связей между слагающими их компонентами и возникновения в таких породах сейсмoeлектрического эффекта  
Table 1. Rock classification based on constituting components bondings and seismoelectric effect occurrence

Соотношение параметров	$\frac{C_D \pi^2}{L^2} \gg 1$ , $L$ короткие	$\frac{C_D \pi^2}{L^2} \gg 1$ , $L$ любые	$\frac{C_D \pi^2}{L^2} \sim (1 - 200)$	$\infty \gg \frac{C_D \pi^2}{L^2} > \sim 200$
Тип связи	Совершенная связь между компонентами	Отсутствующая связь между компонентами	Несовершенная связь между компонентами	Несовершенная связь между компонентами
Возможность возникновения СЭЭ	СЭЭ мал, может быть зарегистрирован лишь при высоких значениях $\zeta$ -потенциала	СЭЭ слабый	СЭЭ мал – слабо проницаемые породы	СЭЭ возникает, проницаемость пород высокая и средняя
Тип пород	Глины, сильно глинистые породы	Промытые галечники, крупнозернистые пески и песчаники, рифовые известняки, нецементированные породы ( $k_{PR} \sim 100-1000$ )	Все породы с низкой и весьма низкой проницаемостью, магматические, эффузивные, интрузивные породы кроме глин ( $k_{PR} < 1$ )	Песчаники, известняки, трещиноватые ( $k_{PR} \sim 1-100$ )

чинает передвигаться относительно твердой фазы. При выключении электрического поля возникает обратный процесс, то есть ионы в породе стремятся вернуться в статическое равновесие. Процессы вызванной поляризации осложняют процессы становления поля, искажая «нормальный» спад электродвижущей силы вплоть до смены знака. С одной стороны, интерпретация таких сигналов представляет значительные трудности, с другой, именно этот процесс дает геофизикам дополнительную, иногда решающую информацию о петрофизических особенностях и/или структурных особенностях разреза.

Используя феноменологический анализ Ф.М. Каменецкий установил основные соотношения между поляризуемостью  $\eta$  и постоянной спада вызванной поляризации  $\tau$ . Им было показано, что высокая поляризуемость соотносится с малыми значениями постоянной спада, и наоборот, если поляризуемость горных пород низкая, то постоянная спада будет большой.

В [23] показано, что параметр поляризуемости может быть представлен как

$$\eta = \sigma_{\Delta} / \sigma_{\chi}, \quad (25)$$

где  $\sigma_{\chi} = zFU_0(C_a - C_c)$  – электропроводность порового электролита;  $\sigma_{\Delta} = zFU_0(C_a + C_c)$  –

электропроводность диффузной и плотной части ДЭС;  $U_0$  и  $z$  – подвижность и валентность ионов,  $F$  – число Фарадея. При этом  $\sigma_{\chi} + \sigma_{\Delta} = \sigma_0$ , то есть электропроводность свободного раствора является нейтральной<sup>1,4</sup>. Формула (25) следует из известного соотношения  $\sigma_{\chi} = \sigma_0 / (1 - \eta)$ . В [23] также было показано, что постоянная спада вызванной поляризации  $\tau$  пропорциональна квадрату радиуса пор  $r$  и может быть оценена как

$$\tau \approx \frac{\sigma_0 r^2 \delta}{5.8 v_d}, \quad (26)$$

где  $\delta$  – плотность породы. Из формулы (25) следует, что максимальное значение, которое может достигать поляризуемость  $\eta$  равно единице. Это происходит в том случае, когда все одноименно заряженные ионы (как правило, анионы) представляют ДЭС, а вторая часть ионов (катионы) – свободный раствор. Такая ситуация может иметь место в тонкопористых породах, например, глинах. Однако формула (26) показывает, что в этом случае следует ожидать чрезвычайно малых значений  $\tau$ , то есть процесс спада вызванной поляризации происходит чрезвычайно быстро и электроосмотический тип поляризации не может быть зарегистрирован методами элект-

<sup>4</sup> Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии: учебник для вузов. СПб.: Лань, 2023. 412 с.



троразведки. Это несомненно соответствует типу пород с совершенной связью между компонентами.

Другой предельный случай – породы с широкими порами. В этом случае объемом ДЭС можно пренебречь, и тогда  $\eta$  будет малой величиной. Но в соответствии с (26) величина  $\tau$  будет чрезвычайно велика, и поляризационные процессы в таких породах не могут быть зарегистрированы в силу ограниченного динамического диапазона аппаратуры, используемой в методе становления поля и естественного уровня помех. Несомненно, что в этом случае мы имеем дело с породами с отсутствующей связью между компонентами. Однако в случае осмотической поляризации мы опираемся на такой линейный параметр, как радиус пор, а в случае СЭЭ – длины поры. Однако в реальных горных породах длина и радиус пор часто взаимосвязаны.

В соответствии с классификацией пор по размерам выделяют сверхкапиллярные, капиллярные и субкапиллярные поры.

К первому типу пород относятся магматические и метаморфические породы. Радиус пор таких пород  $r_1 = (10^{-9} - 10^{-7})$  м. Таким образом, подставив в (26) значение  $r_1 = 10^{-6}$  м и  $\eta = 0,5$ , получим, что  $\tau = 0,26 \mu\text{с}$ , а если  $r_1 = 10^{-7}$  м и  $\eta = 1$  (максимальное значение), то  $\tau \sim 3,5 \text{ нс}$ . Таким образом, приходим к важному выводу: электроосмотические явления, возникающие в тонкокапиллярных средах, таких как глины, то есть в породах с совершенной связью между компонентами, завершаются быстро, в наносекундном интервале времен. Невзирая на то, что поляризуемость пород высока, так как значительное число ионов адсорбировано ДЭС и  $\lim_{r_1 \rightarrow 0} \sigma_{\Delta} \rightarrow \sigma_{\chi}, \eta \rightarrow 1$ . В таких породах постоянная спада всегда несопоставимо мала с длиной любого переходного процесса становления поля. Такие процессы не могут быть зарегистрированы, поскольку современной аппаратурой регистрируются процессы,

начиная лишь с первых микросекунд. Однако они могут быть выявлены методами частотного зондирования и, прежде всего, изучены с помощью данных лабораторных измерений.

К третьему типу пород, то есть к породам с отсутствующей связью между компонентами относятся крупнопористые породы, такие как гравий. В том случае, когда радиус пор большой,  $r_1 > 0,5 \times 10^{-4}$  м, (а это уже макропоры, то есть сверхкапиллярные поры), то подставив это значение  $r_1 > 1 \times 10^{-3}$  и  $\eta = 0,001$ , получим  $\tau \sim 0,17$ . Большой радиус пор, безусловно, увеличит постоянную спада. Однако, с физической точки зрения, влияние ДЭС в широких порах чрезвычайно мало. Для сравнения, толщина диффузной части ДЭС для одновалентных растворов составляет  $10^{-8}$  м, пусть даже  $10^{-7}$  м, тогда как радиус пор в породах с отсутствующей связью выше, чем  $\sim 1 \times 10^{-4}$  м. Таким образом, величина  $\eta = \sigma_{\Delta} / \sigma_{\chi} \rightarrow 0$  и, соответственно, удельная электропроводность поляризуемой породы  $\sigma(t)$  (25) будет равна  $\sigma_0$ .

К породам с несовершенной связью между компонентами относятся пески, песчаники, алевролиты, рыхлые известняки и доломиты. Это породы с радиусами пор  $5 \cdot 10^{-6} < r_1 < 1 \cdot 10^{-4}$  м. Таким образом, в породах с отсутствующей связью между компонентами, невзирая на длинный процесс становления, поляризуемость будет мала. Очевидно, понятие электроосмотической поляризуемости напрямую связано с классификацией пород по размерам пор. В табл. 2 обобщены расчеты по формуле (26).

Отметим, что здесь дано лишь приблизительное соотношение «радиус пор/поляризуемость», поскольку формула для расчета (32) базируется лишь на первом члене функции Бесселя ( $n = 1$ ). Тем не менее, совершенно очевидно, что электроосмотический эффект возникает во всех без исключения породах, но интенсивность этого процесса различна для пород с разной степенью взаимодействия между компонентами.

Таблица 2. Рассчитанные значения постоянной спада вызванной поляризации  $\tau$  в зависимости от радиуса пор и соответствующая им связь между компонентами пород

Table 2. Calculated values of the induced polarization decay constant  $\tau$  depending on the pore radius and the corresponding bonding of rock components

$r_1$ , м	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$\eta$	1	0,5	0,1	0,1	0,05	0,05	0,01	0,01	0,001
$\tau$	3,5 нс	0,26 мкс	4,8 мкс	19 мкс	73 мкс	0,45 мс	1,7 мс	7 мс	43 мс
Связь	Совершенная	Совершенная	Несовершенная	Несовершенная	Несовершенная	Несовершенная	Несовершенная	Отсутствует	Отсутствует



Промежуточные по размерам пор породы, то есть породы с несовершенной связью между компонентами, являются истинными генераторами электроосмотической поляризации. При соответствующем соотношении  $\tau/\eta$  амплитуда электроосмотической поляризации может оказаться достаточной для его обнаружения во временной области процессов становления поля. При зондированиях различных в геологическом отношении сред, в первую очередь высокоомных, эффекты вызванной поляризации могут быть зарегистрированы в полевых условиях. Многолетний опыт использования метода зондирования становлением поля в ближней зоне с различной аппаратурой и в разнообразных средах показали, что постоянные спада составляют от нескольких микросекунд до десятков миллисекунд.

### Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Используя математические представления М. Био об учете в волновом уравнении, движение жидкости относительно твердой ма-

трицы для медленных сейсмических волн и задачи Р. Чандлера об установлении давления внутри поры, были проведены расчеты амплитуды СЭЭ в пористых горных породах.

2. Рассчитаны амплитуды СЭЭ для пород с совершенной, несовершенной и отсутствующей связями между компонентами (твердая матрица – жидкий компонент).

3. Показано, что СЭЭ может возникать только в породах с несовершенной связью между компонентами, где под действием градиента давления жидкость в порах начинает передвигаться относительно твердой фазы. Этот эффект возникает в породах со средней и высокой проницаемостью.

4. При зондированиях становлением поля электрокинетический эффект электроосмотического типа возникает в породах с несовершенной связью при радиусах пор  $5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$  м, что также соответствует слабо-, средне- и высокопроницаемым породам. Расчеты показали, что эффекты вызванной поляризации можно обнаружить лишь при постоянной спада вызванной поляризации  $\tau \sim 1 \mu\text{с} - n \text{ мс}$ .

### Список источников

1. Иванов А.Г. Эффект электризации пластов Земли при прохождении через нее упругих волн // Доклады Академии наук СССР. 1939. Т. 24. № 1. С. 41–43.
2. Иванов А.Г. Электросейсмический эффект второго рода // Известия Академии наук СССР. Серия географическая и геофизическая. 1940. Т. 9. № 5. С. 699–727.
3. Ageeva O.A., Svetov B.S., Sherman G.K., Shipulin V. E-effect in rocks // Russian Geology and Geophysics. 1999. Iss. 64. P. 1349–1356.
4. Martner S.T., Sparks N.R. The electroseismic effect // Geophysics. 1959. Vol. 24. Iss. 2. P. 297–308. <https://doi.org/10.1190/1.1438585>.
5. Broding R.A., Buchanan S.D., Hearn D.P. Field experiments on the electroseismic effect // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. 1963. Vol. 1. Iss. 1. P. 23–31. <https://doi.org/10.1109/TGE.1963.271176>.
6. Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В. Скважинные и лабораторные исследования сейсмозлектрического эффекта второго рода в горных породах // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1971. № 9. С. 88–92.
7. Мигунов Н.И. О сейсмозлектромагнитном эффекте рудных тел // Известия Академии Наук СССР. Физика Земли. 1987. № 11. С. 99–107.
8. Neev J., Yatts F.R. Electrokinetic effects in fluid saturated poroelastic media // Physical Review B. 1989. Vol. 40. Iss. 13. P. 9135–9141. <https://doi.org/10.1103/physrevb.40.9135>.
9. Maxwell M., Russel R.D., Kopic A.W., Butler K.E. Electromagnetic responses from seismically excited targets B: non piezoelectric phenomena // Exploration Geophysics. 1992. Vol. 23. Iss. 2. P. 201–208. <https://doi.org/10.1071/EG992201>.
10. Thompson A.H., Gist G.A. Geophysical applications of electrokinetic conversion // The Leading Edge. 1993. Vol. 12. Iss. 12. P. 1169–1173.
11. Butler K.E., Russell R.D., Kopic A.W., Maxwell M. Measurement of the Seismoelectric Response from a Shallow Boundar // Geophysics. 1996. Vol. 61. Iss. 6. P. 1769–1778. <https://doi.org/10.1190/1.1444093>.
12. Butler K.E., Russell R.D., Kopic A.W., Maxwell M. Seismoelectric exploration // The Leading Edge. 1997. Vol. 16. Iss. 11. P. 1611–1615. <https://doi.org/10.1190/1.1437536>.
13. Mikhailov O.V., Haartsen M.W., Toköz M.N. Electrostatic investigation of the shallow subsurface: field experiments and numerical modeling // Geophysics. 1996. Vol. 62. Iss. 1. P. 97–105. <https://doi.org/10.1190/1.1444150>.
14. Mikhailov O.V., Queen J., Toköz M.N. Using borehole electrostatic measurements to detect and characterize fractured (permeable) zone // Geophysics. 2000. Vol. 65. Iss. 4. P. 1098–1112. <https://doi.org/10.1190/1.1444803>.
15. Beamish D. Characteristic of near surface electrokinetic coupling // Geophysical Journal International. 1999. Vol. 137. Iss. 1. P. 231–242. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00785.x>.



16. Светов Б.С., Агеев В.В., Александров П.Н., Агеева О.А., Бабабянц И.П., Баландина С.Е. [и др.]. Некоторые результаты экспериментальных полевых сейсмoeлектрических исследований // Геофизика. 2001. № 6. С. 47–52. EDN: VBTEQX.
17. Светов Б.С., Агеева О.А., Лисицын В.С. Скважинные исследования сейсмoeлектрических явлений // Геофизика. 2001. № 3. С. 44–48.
18. Алексеев Д.А., Гохберг М.Б., Гончаров А.А., Плисс А.О. Численное моделирование сейсмoeлектрических полей, возбуждаемых импульсными сейсмическими источниками // Вестник Российской академии естественных наук. 2022. Т. 22. № 4. С. 69–79. <https://doi.org/10.52531/1682-1696-2022-22-4-69-79>.
19. Молчанов А.А., Сидоров В.А., Николаев Ю.В., Яхин А.М. Новые типы переходных процессов при электромагнитных зондированиях // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1984. № 1. С. 100–103.
20. Walker G.G., Kawasaki K. Observation of double sign reversals in transient electromagnetic central induction soundings // Exploration. 1988. Vol. 25. Iss. 3. P. 245–254.
21. Губатенко В.П. Эффект Максвелла – Вагнера в электроразведке // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1991. № 4. С. 326–334.
22. Бердичевский М.Н., Губатенко В.П., Светов Б.С. Частотная дисперсия электрических свойств макроанизотропной среды // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1995. № 9. С. 42–48.
23. Задорожная В.Ю., Бессонов А.Д. Эффект вызванной поляризации как индикатор загрязнения грунтовых вод углеводородами // Геология и геофизика. 2002. № 12. С. 1074–1084.
24. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Zakharkin A.K., Korsakov M.A. TEM surveys for search of taliks in areas of strong fast-decaying IP effect // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. Iss. 12. P. 1452–1460. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.009>.
25. Gassman F. Über die Elastizität Poröser Medien // Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik. 1951. Vol. 96. P. 1–53.
26. Хальбауэр-Задорожная В.Ю., Стеттлер Э.Х. Электрокинетические зондирования: математическое моделирование и интерпретация полевых данных // Первая всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли: тезисы докладов (г. Москва, 4–7 октября 2021 г.). М., 2021. С. 120–126. EDN: JGYCFF.
27. Chandler R.N. Transient streaming potential measurements on fluid-saturated pore structures: an experimental verification of Biot's slow wave in quasi-static limit // Journal of Acoustical Society of America. 1981. Vol. 70. Iss. 1. P. 116–121. <https://doi.org/10.1121/1.386689>.
28. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. Low frequency ranges // Journal of Acoustical Society of America. 1956. Vol. 28. P. 168–178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>.
29. Chandler R.N., Johnson D.L. The equivalence of quasistatic flow in fluid-saturated porous media and Biot's slow wave in the limit of zero frequency // Journal of Applied Physics. 1981. Vol. 52. Iss. 5. P. 3391–3395.
30. Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu. Fractal model of rocks – a useful model for the calculation of petrophysical parameters // International Journal of Communications, Network and System Sciences. 2013. Vol. 6. Iss. 4. P. 186–196. <https://doi.org/10.4236/ijcns.2013.64022>.

### References

1. Ivanov A.G. The effect of electrification of the Earth's layers during the elastic waves' propagation. *Academy of Sciences of the USSR*. 1939;24(1):41-43. (In Russ.).
2. Ivanov A.G. Electro seismic effect of the second order. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*. 1940;9(5):699-727. (In Russ.).
3. Ageeva O.A., Svetov B.S., Sherman G.K., Shipulin V. E-effect in rocks. *Russian Geology and Geophysics*. 1999;64:1349-1356.
4. Martner S.T., Sparks N.R. The electro seismic effect. *Geophysics*. 1959;24(2):297-308. <https://doi.org/10.1190/1.1438585>.
5. Broding R.A., Buchanan S.D., Hearn D.P. Field experiments on the electro seismic effect. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*. 1963;1(1):23-31. <https://doi.org/10.1109/TGE.1963.271176>.
6. Parkhomenko E.I., Gaskarov I.V. Borehole and laboratory studies of the second-order seismo electric effect in rocks. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1971;9:88-92. (In Russ.).
7. Migunov N.I. On the seismo electromagnetic effect of ore bodies. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1987;11:99-107. (In Russ.).
8. Neev J., Yatts F.R. Electrokinetic effects in fluid saturated poroelastic media. *Physical Review B*. 1989;40(13):9135-9141. <https://doi.org/10.1103/physrevb.40.9135>.
9. Maxwell M., Russel R.D., Kecip A.W., Butler K.E. Electromagnetic responses from seismically excited targets B: non piezoelectric phenomena. *Exploration Geophysics*. 1992;23(2):201-208. <https://doi.org/10.1071/EG992201>.
10. Thompson A.H., Gist G.A. Geophysical applications of electrokinetic conversion. *The Leading Edge*. 1993;12(12):1169-1173.
11. Butler K.E., Russell R.D., Kecip A.W., Maxwell M. Measurement of the seismo electric response from a shallow boundar. *Geophysics*. 1996;61(6):1769-1778. <https://doi.org/10.1190/1.1444093>.
12. Butler K.E., Russell R.D., Kecip A.W., Maxwell M. Seismo electric exploration. *The Leading Edge*. 1997;16(11):1611-1615. <https://doi.org/10.1190/1.1437536>.



13. Mikhailov O.V., Haartsen M.W., Toköz M.N. Electro seismic investigation of the shallow subsurface: field experiments and numerical modeling. *Geophysics*. 1996;62(1):97-105. <https://doi.org/10.1190/1.1444150>.
14. Mikhailov O.V., Queen J., Toköz M.N. Using borehole electro seismic measurements to detect and characterize fractured (permeable) zone. *Geophysics*. 2000;65(4):1098-1112. <https://doi.org/10.1190/1.1444803>.
15. Beamish D. Characteristic of near surface electrokinetic coupling. *Geophysical Journal International*. 1999;137(1):231-242. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00785.x>.
16. Svetov B.S., Ageev V.V., Aleksandrov P.N., Ageeva O.A., Bababyants I.P., Balandina S.E., et al. Some results of experimental field seismoelectric studies. *Geophysics*. 2002;6:47-52. (In Russ.). EDN: VBTEQX.
17. Svetov B.S., Ageeva O.A., Lisitsyn V.S. Borehole studies of seismoelectric phenomena. *Geophysics*. 2001;3:44-48. (In Russ.).
18. Alekseev D.A., Gokhberg M.B., Goncharov A.A., Pliss A.O. Numerical simulation of the seismoelectric field generated by the impulse seismic source. *Russian Academy of Natural Sciences*. 2022;22(4):69-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.52531/1682-1696-2022-22-4-69-79>.
19. Molchanov A.A., Sidorov V.A., Nikolaev Yu.V., Yakhin A.M. New types of transient processes in electromagnetic soundings. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1984;1:100-103. (In Russ.).
20. Walker G.G., Kawasaki K. Observation of double sign reversals in transient electromagnetic central induction soundings. *Exploration*. 1988;25(3):245-254.
21. Gubatenko V.P. Maxwell – Wagner effect in electrical prospecting. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1991;4:326-334. (In Russ.).
22. Berdichevsky M.N., Gubatenko V.P., Svetov B.S. Frequency dispersion of the electrical properties of a macroanisotropic medium. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1995;9:42-48. (In Russ.).
23. Zadorozhnaya V.Yu., Bessonov A.D. The effect of induced polarization as an indicator of groundwater pollution by hydrocarbons. *Russian Geology and Geophysics*. 2002;12:1074-1084. (In Russ.).
24. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Zakharkin A.K., Korsakov M.A. TEM surveys for search of taliks in areas of strong fast-decaying IP effect. *Russian Geology and Geophysics*. 2014;55(2):1452-1460. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.009>.
25. Gassman F. Über die Elastizität Poröser Medien. *Mitteilunden aus dem Institut für Geophysik*. 1951;96:1-53. (In Germ.).
26. Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu., Stettler E.H. Electrokinetic soundings: mathematical modeling and interpretation of field data. In: *Pervaya vserossiiskaya shkola-seminar po ehlektromagnitnym zondirovaniyam Zemli: tezisy dokladov = The First All-Russian school-seminar on electromagnetic sounding of the Earth: abstracts of reports*. 4–7 October 2021, Moscow. Moscow, 2021, p. 120-126. (In Russ.). EDN: JGYCFF.
27. Chandler R.N. Transient streaming potential measurements on fluid-saturated pore structures: an experimental verification of Biot's slow wave in quasi-static limit. *Journal of Acoustical Society of America*. 1981;70(1):116-121. <https://doi.org/10.1121/1.386689>.
28. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. Low frequency ranges. *Journal of Acoustical Society of America*. 1956;28:168-178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>.
29. Chandler R.N., Johnson D.L. The equivalence of quasistatic flow in fluid-saturated porous media and Biot's slow wave in the limit of zero frequency. *Journal of Applied Physics*. 1981;52(5):3391-3395.
30. Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu. Fractal model of rocks – a useful model for the calculation of petrophysical parameters. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2013;6(4):186-196. <https://doi.org/10.4236/ijcns.2013.64022>.

#### Информация об авторе / Information about the author



#### **Хальбауер-Задорожная Валерия Юрьевна,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
профессор,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

✉ [valeriya.hallbauer@geo.estu.edu](mailto:valeriya.hallbauer@geo.estu.edu), [valeriy.hallbauer@gmail.com](mailto:valeriy.hallbauer@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-9213-8346>

#### **Valeriya Yu. Hallbauer-Zadorozhnaya,**

Cand. Sci. (Geol.-Mineral.),  
Professor,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,

✉ [valeriya.hallbauer@geo.estu.edu](mailto:valeriya.hallbauer@geo.estu.edu), [valeriy.hallbauer@gmail.com](mailto:valeriy.hallbauer@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-9213-8346>



#### **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 11.04.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 21.08.2024.

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 06.05.2024; accepted for publication 21.08.2024.



## ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 556.332.629

EDN: FSIDJJ

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-280-288



### Условия формирования месторождений пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна

А.И. Кураничева<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель данного исследования заключалась в представлении результатов детализации гидрогеологических условий крупной гидрогеологической структуры – Иркутского артезианского бассейна II порядка. Для выделения территорий с различными условиями формирования месторождений пресных подземных вод и выявления границ крупных низменностей и возвышенностей рельефа в сопоставлении с геологической структурой использовался метод морфоструктурного анализа. Для обобщения автором привлечены данные по 45 месторождениям пресных питьевых подземных вод, разведанных на территории Иркутского артезианского бассейна II порядка с эксплуатационными запасами более 500 м<sup>3</sup>/сут. К крупным возвышенностям рельефа в пределах тектонических впадин приурочены месторождения пресных подземных вод в юрских терригенных породах, а к тектоническим поднятиям приурочены месторождения как в кембрийских карбонатных, так и в юрских и ордовикских терригенных отложениях. Месторождения восполняются за счет естественных ресурсов. Питание эксплуатационных горизонтов крупных месторождений в кембрийских и ордовикских породах происходит за счет привлекаемых ресурсов. В пониженных частях рельефа месторождения пресных подземных вод формируются только в четвертичных аллювиальных отложениях за счет инфильтрации из рек (привлекаемых ресурсов). Решающее влияние на формирование естественных ресурсов и динамических запасов, на локализацию подземного стока оказали неотектонические движения, обеспечив распределение и локализацию поверхностного и подземного стока. К тому же при выявлении перспективных участков поисков пресных подземных вод целесообразно опираться на закономерности распределения запасов пресных подземных вод уже разведанных месторождений в пределах выявленных морфоструктур.

**Ключевые слова:** Иркутский артезианский бассейн, месторождение пресных вод, естественные ресурсы, привлекаемые ресурсы

**Для цитирования:** Кураничева А.И. Условия формирования месторождений пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 280–288. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-280-288>. EDN: FSIDJJ.

## GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Brief report

### Formation conditions of fresh groundwater deposits in Irkutsk artesian basin

Anna I. Kuranicheva<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The purpose of the research is to give a detailed description of hydrogeological conditions of the Irkutsk artesian basin, which is a large hydrogeological structure of the second order. The method of morphostructural analysis has been used to distinguish the territories with different formation conditions of fresh groundwater deposits as well as to identify the boundaries of large lowlands and uplands in comparison with the geological structure. To make a generalization, the author uses the data on 45 deposits of fresh drinking groundwater explored on the territory of the Irkutsk artesian basin of the second order with the operational reserves of more than 500 m<sup>3</sup>/day. Deposits of fresh groundwater in Jurassic terrigenous rocks are confined to large relief elevations within tectonic depressions while the deposits in both Cambrian carbonate and Jurassic-Ordovician terrigenous



sediments are confined to tectonic uplifts. The deposits are replenished by natural resources. The production horizons of large deposits in Cambrian and Ordovician rocks are fed by attracted resources. In the lowlands the deposits of fresh groundwater are formed only in Quaternary alluvial deposits, due to infiltration from rivers (attracted resources). Neotectonic movements are the ones that had a dominant influence on the formation of natural resources and dynamic reserves as well as on underground flow localization as they ensured the distribution and localization of surface and underground flow. It is also noted that when identifying promising areas for searching for fresh underground water, it is advisable to rely on the distribution patterns of fresh underground water reserves of already explored deposits within the identified morphostructures.

**Keywords:** Irkutsk artesian basin, fresh groundwater deposit, natural resources, attracted resources

**For citation:** Kuranicheva A.I. Formation conditions of fresh groundwater deposits in Irkutsk artesian basin. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):280-288. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-280-288>. EDN: FSIDJJ.

## Введение

Пресные питьевые подземные воды представляют собой одно из важнейших полезных ископаемых, обеспечивающих развитие социальной сферы и экономики исследуемой территории. Вследствие чего водоснабжение остается главным условием жизни городских агломераций и крупных населенных пунктов. Главным базовым и промышленным узлом Иркутской области является зона городов Шелехов – Иркутск – Ангарск – Усолье-Сибирское – Саянск, вытянутая вдоль Транссибирской магистрали по всему Иркутскому артезианскому бассейну II порядка (далее: Иркутский артезианский бассейн), который является наиболее крупной структурой Ангаро-Ленского артезианского бассейна I порядка [1].

В связи с постоянно возрастающим развитием промышленного производства и ростом населения городов из года в год увеличивается потребность в обеспечении их качественными питьевыми водами. Поэтому для хозяйственно-питьевого водоснабжения необходимы надежные источники воды с хорошим качеством, неподверженные загрязнению. Поверхностные воды испытывают высокую антропогенную нагрузку и чаще всего подвержены загрязнению. Выше крупных населенных пунктов и по течению рек нередко бывают расположены различные предприятия и другие городские агломерации, что является причиной постоянного ухудшения качества поверхностных вод [1–6]. Поэтому для водоснабжения населенных пунктов широко

используются месторождения питьевых подземных вод.

## Материалы и методы исследования

Сформулирована гипотеза о ведущей роли морфоструктурного фактора и закономерностей соотношения «геологическая структура – рельеф». Привлечение данных морфологического анализа рельефа и геолого-структурных условий (морфоструктурного анализа) является эффективным методом для выделения территорий с различными условиями формирования месторождений пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна [7, 8]. Данные территории соответствуют тектонической схеме структур кайнозойского и мезозойского этапов активизации юга Сибирской платформы<sup>1,2</sup>. В процессе выполненной работы методами морфоструктурного анализа уточнены границы возвышенностей и низменностей рельефа в более крупном масштабе, которые сопоставлены с геологическими структурами мезозойского этапа тектонической активизации Иркутского артезианского бассейна.

С учетом сложившихся взглядов на неотектонические (масштаб – 1:4000000 и мельче [9–10]<sup>3</sup>), гидрогеологические карты (карты 1:4000000 [11] и 1:1000000<sup>4</sup>), автором, на основе топографических и геолого-структурных карт, выполнен морфоструктурный анализ Иркутского артезианского бассейна для выделения территорий с различными гидрогео-

<sup>1</sup> Галимова Т.Ф., Пашкова А.Г., Поваринцева С.А., Перфильев М.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение), Ангаро-Енисейская серия. Лист N-47 (Нижнеудинск). Объяснительная записка. СПб., 2012. 652 с.

<sup>2</sup> Галимова Т.Ф., Пермяков С.А., Бобровский В.Т. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение), Ангаро-Енисейская серия. Лист N-48 (Иркутск). Объяснительная записка. СПб., 2009. 574 с.

<sup>3</sup> Флоренсов Н.А. Новейшие движения земной коры // Атлас Иркутской области / под ред. И.П. Заруцкой М.; Иркутск: Главное управление геодезии и картографии Министерства геологии и охраны недр СССР, 1962. 182 с.

<sup>4</sup> Попов А.И. Подземные воды // Атлас Иркутской области / под ред. И.П. Заруцкой М.; Иркутск: Главное управление геодезии и картографии Министерства геологии и охраны недр СССР, 1962. 182 с.



логическими условиями в крупном масштабе 1:200000, так как выявить закономерности таких территорий на картах мелкого масштаба весьма затруднительно.

На итоговой схеме представлены месторождения пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна в границах распространения мезозойских отложений. Для этого были использованы фондовые материалы, которые вынесены на итоговую морфоструктурную схему масштаба 1:200000. Таким образом были выделены территории по морфоструктурным признакам со схожими условиями формирования месторождений пресных подземных вод. Привлечены и проанализированы данные по 45 месторождениям пресных питьевых подземных вод, разведанных на территории Иркутского артезианского бассейна с запасами более 500 м<sup>3</sup>/сут.<sup>5,6</sup>. Не учитывались запасы подземных вод, списанные с государственного баланса в связи с недостаточной

для категоризации геолого-гидрогеологической изученностью, связанной с отсутствием обоснования источника формирования ресурсов подземных вод. Запасы подземных вод, списанные из-за невозможности организации зон санитарной охраны в связи с застройкой территории месторождений, автором учитывались, так как эти факторы не влияют на формирование запасов.

Общая схема была собрана в демонстрационную графику масштаба 1:1500000. В итоге получена уточненная на основе морфоструктурного анализа схема территорий Иркутского артезианского бассейна с различными гидрогеологическими условиями формирования месторождений пресных подземных вод в границах развития структур мезозойского этапа тектонической активизации. Выделенные территории в соответствии с морфоструктурной типизацией (рис. 1) приведены на рис. 2, 3, где показаны границы крупных пони-

Характер морфоструктур	Характер геологических плективных дислокаций	Типовая схема	Тип морфоструктур
Положительные	Положительные		Прямая
	Отрицательные		Обращенная
Отрицательные	Положительные		Обращенная
	Отрицательные		Прямая



**Рис. 1. Схема типизации морфоструктур (согласно источнику [13]):**

1 – морфоструктура (поверхность рельефа); 2 – геологическая структура;

3 – лито-фациальные (стратиграфические) толщи

**Fig. 1. Morphostructure typification diagram (according to [13]):**

1 – morphostructure (relief surface); 2 – geological structure; 3 – lithofacies (stratigraphic) strata

<sup>5</sup> Сводные данные о состоянии ресурсной базы подземных вод по территории Иркутской области в 2020 году. Томск: СРЦ ГМСН, 2021. С. 11.

<sup>6</sup> Отчет по объекту «Оценка состояния месторождений питьевых и технических подземных вод в нераспределенном фонде недр с целью приведения их запасов в соответствие с действующим законодательством на территории Республики Бурятия, Забайкальского края и Иркутской области». Томск: ОАО «Томскеомониторинг», 2014.



жений рельефа (отрицательных морфоструктур) на общем фоне возвышенностей рельефа (положительных морфоструктур). Верхней границей служит рельеф, так как результаты неотектонических движений подчеркиваются особенностями современного рельефа, представляющего собой сочетание денудационных возвышенностей и аккумулятивных низменностей [12]. Нижней границей служит подошва юрских отложений (см. рис. 1).

### Результаты исследования и их обсуждение

В соотношении «рельеф – геологическая структура» выявлены определенные закономерности формирования месторождений пресных подземных вод за счет естественных и привлекаемых ресурсов. Ниже представлены такие закономерности для крупных возвышенностей (положительных морфоструктур) и низменностей (отрицательных морфоструктур) в соотношении со структурой подошвы мезозойских отложений (см. рис. 1). В пределах положительных морфоструктур формирование запасов происходит за счет естественных и привлекаемых ресурсов, в пределах отрицательных – преимущественно за счет привлекаемых ресурсов.

*1. Формирование месторождений за счет естественных ресурсов подземных вод:*

*1.1. В междуречьях крупных рек (Ангара, Иркут, Китой, Ока и других), являющихся возвышенностями рельефа (положительной морфоструктуры):*

*В пределах положительных геологических структур по подошве юрских отложений.* Формирование запасов месторождений происходит за счет естественных ресурсов юрских терригенных отложений:

– в юрских терригенных отложениях (это месторождения Мурынское, Оекское, Малокотинское, Кировское, Мхатское, Каранцайское, Бурдаковское, Каролокское);

– в кембрийских карбонатных и ордовикских карбонатно-терригенных отложениях, формирование запасов подземных вод обусловлено вертикальным перетоком подземных вод из юрских терригенных отложений (это месторождения Мальтинское, Заларинское, Тыретское, Кутуликское, Алгатуйское, Анзаводское, Промплощадка Азейского, Анганское);

– в кембрийских карбонатных отложениях, выходящих на дневную поверхность (место-

рождения Нотское, Боминское, Саган-Жалгайское).

За счет ресурсов подземных вод в юрских отложениях при их перетоке в кембрийские и ордовикские отложения формируются месторождения пресных подземных вод на фоне окружающих солоноватых вод, непригодных для питьевого водоснабжения (см. рис. 2).

*1.2. В пределах отрицательных геологических структур по подошве юрских отложений.* Формирование запасов месторождений подземных вод происходит за счет естественных ресурсов в юрских терригенных отложениях. Эти месторождения: Еловское, Юго-Восточное, Булагат-Малоеловское, Вдовинское, Максимовско-Пионерское, Суховское, Тельмино-Биликтуйское, Одинское, Мегетское, Кондитерское, Держинское, Пивоваренское, Завод Родник, Новолисихинское, Усть-Кудинское.

*Формирование месторождений за счет привлекаемых ресурсов подземных вод:*

*2. В долинах крупных рек, пересекающих возвышенности рельефа (положительные морфоструктуры).*

*В пределах положительных геологических структур по подошве юрских отложений.*

Формирование запасов крупных месторождений происходит за счет привлекаемых ресурсов в кембрийских карбонатных и ордовикских карбонатно-терригенных отложениях. Это такие месторождения, как Прибрежно-Аларское, Среднебельское, Хайтинское, Свирское, Красноярское.

*3. В долинах крупных рек, пересекающих низменности рельефа (отрицательные морфоструктуры):*

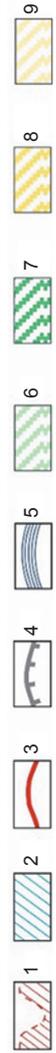
*3.1. В пределах отрицательных геологических структур по подошве юрских отложений.*

Формирование запасов подземных вод крупных месторождений происходит за счет привлекаемых ресурсов в аллювиальных отложениях вблизи русел рек. При вскрытии юрских терригенных отложений наблюдается резкое ухудшение качества подземных вод. Это месторождения Баушинское, Китойское, Иркутское.

*3.2. В пределах положительных геологических структурах по подошве юрских отложений.* Формирование запасов подземных вод крупных месторождений происходит за счет привлекаемых ресурсов в аллювиальных отложениях. Это месторождения Зиминское,



Типовая схема формирования пресных подземных вод	Обозначение на схеме	Тип морфоструктур	Схема морфоструктур	Источник формирования запасов	Условия формирования пресных подземных вод	Месторождения
	1.1	Положительная прямая		Естественные ресурсы подземных вод	1. Между речьями крупных рек (Ангара, Иркут, Китой, Ока и другие) возвышенности рельефа (положительные морфоструктуры). 1.1. Положительные геологические структуры по подошве юрских отложений. Формирование запасов месторождений за счет естественных ресурсов юрских терригенных отложений. – в юрских терригенных отложениях; – в кембрийских карбонатных отложениях, обусловленное вертикальным перетоком подземных вод из юрских терригенных отложений; – в кембрийских карбонатных отложениях, выходящих на дневную поверхность. 1.2. Отрицательные геологические структуры по подошве юрских отложений. Формирование запасов месторождений за счет естественных ресурсов в юрских терригенных отложениях.	Боминское, Саян-Жалгайское, Мурунское, Малынтинское, Запаринское, Таретское, Обское, Малолютинское, Нотское, Кировское, Мхатское, Кулуликское, Каранцайское, Бурдаковское, Каропское, Промплощадка Азейского, Ангарского, Алаутуйское, Анзавадское, Еловское Юго-Восточное, Булагат-Малоеловское, Вдовинское, Максимова-Пионерское, Суховское, Тельмино-Биликтуйское, Одинокое, Мелетское, Кондигерское, Дзержинское, Пивоваренское, Завод Родник, Новолисийское, Усть-Кудинское
	1.2	Положительная обращенная		Естественные ресурсы подземных вод	2. Долины крупных рек, пересекающие возвышенности рельефа (положительные морфоструктуры). Положительные геологические структуры по подошве юрских отложений. Формирование запасов крупных месторождений за счет привлекаемых ресурсов в кембрийских карбонатных и ордовикских карбонатно-терригенных отложениях.	Прибрежно-Аларское, Среднебельское, Хайтинское, Свирское, Красноярское
	2	Положительная прямая		Привлекаемые ресурсы пресных подземных вод	3. Долины крупных рек, пересекающие низменности рельефа (отрицательные морфоструктуры). 3.1. Отрицательные геологические структуры по подошве юрских отложений. Формирование запасов крупных месторождений за счет привлекаемых ресурсов в аллювиальных отложениях вблизи русел рек. При вскрытии юрских терригенных отложений резкое ухудшение качества подземных вод. 3.2. Положительные геологические структуры. Формирование запасов крупных месторождений за счет привлекаемых ресурсов в аллювиальных месторождениях. При вскрытии кембрийских пород ухудшается качество подземных вод, но образуются месторождения технических вод.	Китойское, Иркутское, Баушинское
	3.1	Отрицательная прямая		Привлекаемые ресурсы пресных подземных вод	3.2. Положительные геологические структуры. Формирование запасов крупных месторождений за счет привлекаемых ресурсов в аллювиальных месторождениях. При вскрытии кембрийских пород ухудшается качество подземных вод, но образуются месторождения технических вод.	Черемуховый Куст, Зиминское, Большеиретское
	3.2	Отрицательная обращенная		Привлекаемые ресурсы пресных подземных вод		

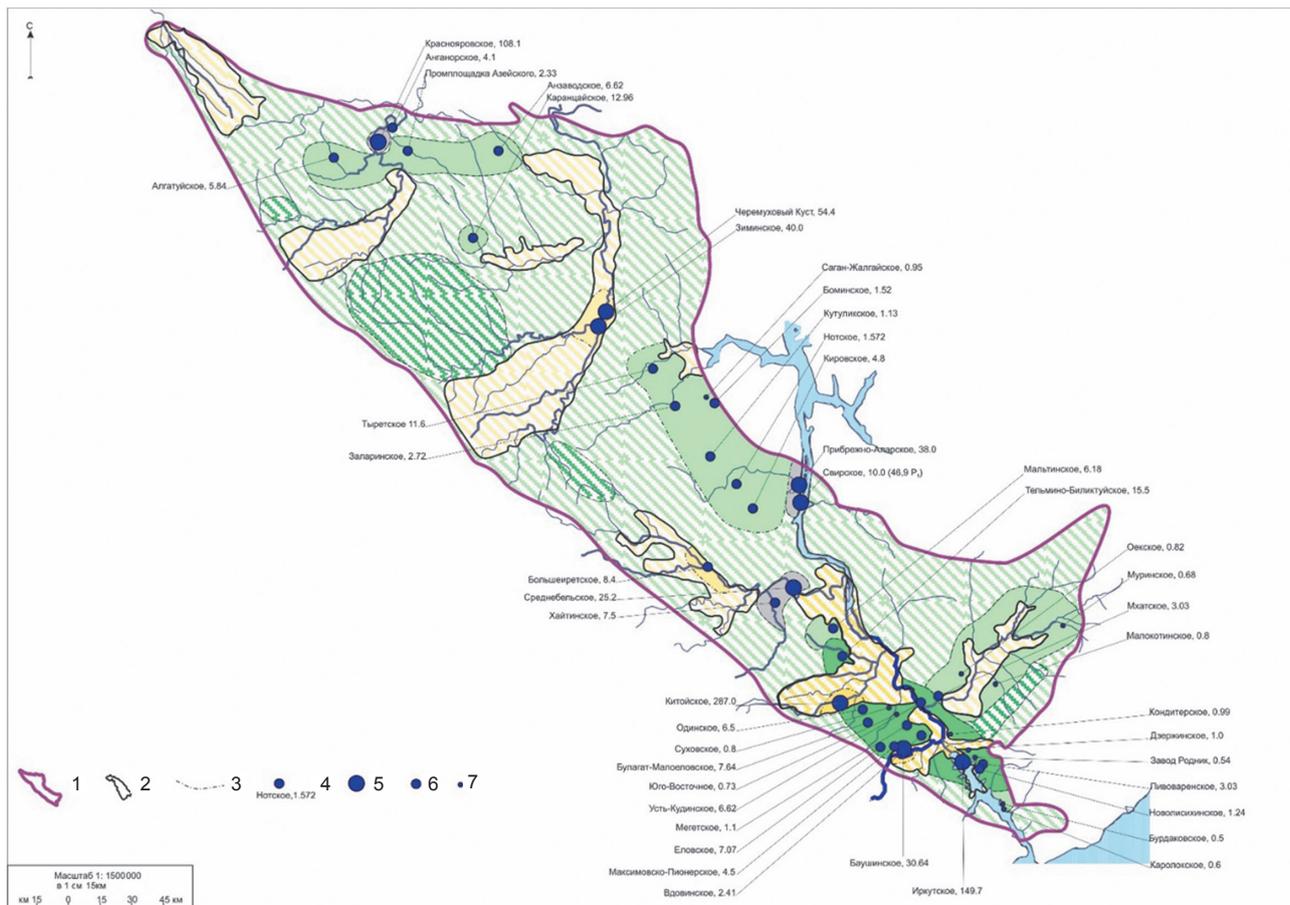


**Рис. 2. Соотношение ресурсов и локализации месторождений пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна:**

1 – зона солоноватых вод с минерализацией более 1 г/дм<sup>3</sup>; 2 – зона пресных вод с минерализацией менее 1 г/дм<sup>3</sup>; 3 – поверхность мерзлота (морфоструктура); 4 – геологическая структура; 5 – лито-фациальные (стратиграфические) толщ; 6–9 – условия, аналогичные мерзлоте: 6 – 1.1, 7 – 1.2, 8 – 3.1, 9 – 3.2

**Fig. 2. Correlation between resources and fresh groundwater deposits localization in the Irkutsk artesian basin:**

1 – saline water zone with mineralization of more than 1 g/dm<sup>3</sup>; 2 – fresh water zone with mineralization of less than 1 g/dm<sup>3</sup>; 3 – relief surface (morphostructure); 4 – geological structure; 5 – lithofacies (stratigraphic) strata; 6–9 – conditions similar to the territory: 6 – 1.1, 7 – 1.2, 8 – 3.1, 9 – 3.2



**Рис. 3. Морфоструктурно-гидрогеологическая схема Иркутского артезианского бассейна с месторождениями пресных подземных вод:**

- 1 – граница Иркутского артезианского бассейна; 2 – крупные понижения рельефа (отрицательные морфоструктуры); 3 – граница территорий с различными условиями формирования подземных вод;
- 4 – месторождение пресных подземных вод, запасы тыс. м<sup>3</sup>;
- 5–7 – месторождения пресных подземных вод с запасами:
- 5 – более 20 тыс. м<sup>3</sup>, 6 – 1–20 тыс. м<sup>3</sup>, 7 – менее 1 тыс. м<sup>3</sup>

**Fig. 3. Morphostructural-hydrogeological diagram of the Irkutsk artesian basin with fresh groundwater deposits:**

- 1– boundary of the Irkutsk artesian basin; 2 – large relief depressions (negative morphostructures);
- 3 – boundary of territories with different conditions of groundwater formation;
- 4 – a fresh groundwater deposit, reserves, thousand m<sup>3</sup>;
- 5–7 – fresh groundwater deposits with the reserves of:
- 5 – more than 20,000 m<sup>3</sup>, 6 – 1,000–20,000 m<sup>3</sup>, 7 – less than 1,000 m<sup>3</sup>

Черемуховый Куст, Большеиретское. При вскрытии кембрийских пород наблюдается ухудшение качества пресных подземных вод, но образуются месторождения технических вод, к примеру, Конноостровское.

Результаты выполненного анализа территории с различными гидрогеологическими условиями позволяют установить, что месторождения пресных подземных вод Иркутского артезианского бассейна в границах мезозойского цикла тектонической активизации и их обеспеченность ресурсами обусловлены природным фактором, зависящим от соотношения «рельеф – геологическая структура».

В пределах крупных отрицательных морфоструктур (низменности рельефа) хозяйственно-питьевое водоснабжение подземными водами можно осуществлять преимущественно за счет привлекаемых ресурсов в обводненных хорошо промытых аллювиальных отложениях вблизи рек. Водные ресурсы имеют транзитный характер в виде рек. Естественные ресурсы незначительны, с подземными водами плохого качества. Поэтому добыча пресных питьевых подземных вод в достаточных объемах возможна только из четвертичных аллювиальных отложений, которые находятся на уровне основного базиса дренирования за счет привлекаемых ре-



сурсов (инфильтрации из рек). Если отступить от русел рек первые сотни метров, то фильтрационные показатели эксплуатационного горизонта за счет плохой промытости водовмещающих пород значительно уменьшаются, качество воды не отвечает питьевым требованиям. При углублении скважин в коренные породы вблизи рек вскрываются солоноватые и даже соленые воды. Это характерно для месторождений подземных вод в крупных понижениях рельефа, так как водоносные комплексы коренных пород залегают ниже основного базиса дренирования. Сами крупные понижения рельефа (отрицательные морфоструктуры), имеющие площадь в десятки квадратных километров или километровую ширину долин в таких местах, не обладают естественными ресурсами, которые могли бы быть использованы для водоснабжения как по объему, так и по качеству воды. В целом, в пределах крупных понижений рельефа (отрицательных морфоструктур) в коренных породах существуют купола солоноватых и соленых вод и даже могут быть встречены рассолы. Например, в ряде скважин Китойского месторождения пресных подземных вод при переуглублении скважин в коренные породы (на глубине 26–30 м) вскрыты воды, по своему составу отличающиеся от состава подземных вод неоген-четвертичного комплекса. Минерализация превышает 3 г/л, наблюдается высокое содержание железа и марганца. В некоторых случаях жесткость подземных вод превышает 7 мг-экв/л<sup>7</sup>. На территории Зиминского месторождения водопроницаемость аллювиальных отложений вблизи русла реки превышает 300–400 м<sup>2</sup>/сут., а в 200–300 м от него уменьшается до 30–60 м<sup>2</sup>/сут., минерализация под-

земных вод с глубиной увеличивается от 0,9 до 2–3 г/дм<sup>3</sup><sup>8</sup>.

В пределах крупных положительных морфоструктур (возвышенности рельефа, междуречий) основные водоносные комплексы в междуречьях крупных рек залегают выше основного базиса дренирования, в зоне интенсивного водообмена. Месторождения пресных подземных вод формируются за счет естественных ресурсов. В долинах рек формирование месторождений происходит за счет привлекаемых ресурсов, так как долины рек могут пересекать как понижения рельефа (к примеру, долины рек Зима, Ока около г. Зимы; река Китой в районе г. Ангарска), так и возвышенности рельефа (долина реки Ангара около г. Свирска и Черемхово, реки Ии в районе г. Тулуна и севернее).

### Заключение

Таким образом, формирование месторождений подземных вод на рассматриваемой территории обусловлено соотношением «рельеф – геологическая структура». Обе составляющие, являющиеся результатом современного тектонического развития региона, предопределили распределение как естественных, так и привлекаемых ресурсов пресных подземных вод в верхней гидродинамической зоне.

Именно для обоснования объектов, перспективных для первоочередных геологоразведочных работ на подземные воды, с целью ускорения качественного водоснабжения крупных населенных пунктов и промышленных центров региона видится прикладное, народно-хозяйственное значение изложенной работы.

### Список источников

1. Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 1. С. 73–84. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>.
2. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Готов В.Е., Иванова Т.П., Кулаков В.В., Ланкин Ю.К. [и др.]. Состояние питьевого водоснабжения на базе подземных вод в Сибири и на Дальнем Востоке // Подземные воды востока России: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXII Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Новосибирск, 18–22 июня 2018 г.). Новосибирск: Изд-во НГУ, 2018. С. 4–20. EDN: UTRVFT.
3. Блохин Ю.И., Лунова Т.Е. Мониторинг промышленного загрязнения подземных вод на территории Иркутской области // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 18–22 июня 2012 г.). Иркутск: Географ, 2012. С. 445–449.

<sup>7</sup> Золотых Т.И. Отчет о результатах работ по объекту «Доразведка участка Верхнекитойский-1 Китойского месторождения подземных вод для обеспечения питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населения Ангарского городского округа», Иркутск: ТГФ, 2021.

<sup>8</sup> Ланкин Ю.К., Лумпов И.А., Лумпова Ж.М. Отчет по переоценке эксплуатационных запасов Зиминского месторождения пресных подземных вод на действующем Шехолайском водозаборе по состоянию на 1 января 2005 года. Иркутск: ТГФ, 2005. С. 14–29.



4. Пиннекер Е.В., Ткачук В.Г., Трофимук П.И. Гидрогеология СССР. Т. 19. Иркутская область. М.: Недра, 1968. 471 с.
5. Шолохов П.А. Аспекты использования подземных вод юрских угленосных отложений в качестве источника водоснабжения (на примере г. Иркутска) // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России с междунар. уч. (XXIII Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 20–26 июня 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2021. С. 562. <https://doi.org/10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-562-565>. EDN: GROPLX.
6. Шенькман Б.М. Гидрогеология промышленных зон Иркутской области // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 18–22 июня 2012 г.). Иркутск: Географ, 2012. С. 499–503.
7. Ткачук В.Г., Пиннекер Е.В. Подземные воды Иркутской области и их народнохозяйственное значение. Иркутск: Иркутское книжное издательство, 1959. 111 с.
8. Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верхозина Е.С. Роль новейшей тектоники в формировании ресурсов подземных вод юга Сибирской платформы // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России с международным участием (XXIV Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г.). Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2024. С. 284–287.
9. Лунева Т.Е., Ланкин Ю.К. Морфотектонические условия локализации ресурсов подземных вод в Ангаро-Ленском артезианском бассейне // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XVIII Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока) (г. Иркутск, 19–23 июня 2006 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. С. 281–284.
10. Золотарев А.Г. Рельеф и новейшая структура Байкало-Патомского нагорья. Новосибирск: Наука, 1974. 120 с.
11. Адаменко О.М., Долгушин И.Ю., Ермолов В.В., Исаева Л.Л., Козловская С.Ф., Леонов Б.Н. [и др.]. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири: монография. М.: Наука, 1971. 323 с.
12. Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 2. С. 116–124. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>. EDN: NNSOYJ.
13. Мещеряков Ю.А. Морфоструктура равнинно-платформенных областей. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1960. 112 с.
14. Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верхозина Е.С. Особенности формирования Свирского месторождения пресных подземных вод // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 190–200. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-190-200>. EDN: WUXDVG.

### References

1. Auzina L.I. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities. *Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):73-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>.
2. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Glotov V.E., Ivanova T.P., Kulakov V.V., Lankin Yu.K., et al. Drinking groundwater supply in Siberia and the Far East. In: *Podzemnye vody vostoka Rossii: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Groundwater of the East of Russia: Proceedings of the All-Russian Conference on Groundwater of the East of Russia (The 22<sup>th</sup> Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2018, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2018, p. 4-20. (In Russ.). EDN: UTRVFT.
3. Blokhin Yu.I., Luneva T.E. Monitoring industrial pollution of underground waters in the Irkutsk region. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia (The 20<sup>th</sup> Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2012, Irkutsk. Irkutsk: Geograf; 2012, p. 445-449. (In Russ.).
4. Pinneker E.V., Tkachuk V.G., Trofimuk P.I. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 19. Irkutsk region*. Moscow: Nedra; 1968, 471 p. (In Russ.).
5. Sholokhov P.A. Aspects of using groundwater from Jurassic coal-bearing deposits as a water supply source (on example of Irkutsk) In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii s mezhdunarodnym uchastiem (XXIII Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia with international participation (The 23<sup>th</sup> Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 20–26 June 2021, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2021, p. 562. (In Russ.). <https://doi.org/10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-562-565>. EDN: GROPLX.
6. Shen'kman B.M. Hydrogeopurgology of industrial zones of the Irkutsk region. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on groundwater of the East of Russia (The 20<sup>th</sup> Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 18–22 June 2012, Irkutsk. Irkutsk: Geograf; 2012, p. 499-503. (In Russ.).
7. Tkachuk V.G., Pinneker E.V. *Groundwater of the Irkutsk region and its national economic significance*. Irkutsk: Irkutskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1959, 111 p. (In Russ.).
8. Lankin Yu.K., Naumova O.O., Verkhosina E.S. The role of neotectonics in groundwater resources formation in the south of the Siberian Platform. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam Vostoka*



Rossii s mezhdunarodnym uchastiem (XXIV Soveshch. po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka) = *Underground hydrosphere: materials of All-Russian meeting on Groundwater of the East of Russia with international participation (The 24<sup>th</sup> Meeting on groundwater of Siberia and the Far East)*. 21–28 June 2024, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Sciences; 2024, p. 284-287. (In Russ.).

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

10. Zolotarev A.G. *Relief and recent structure of the Baikal-Patom Upland*. Novosibirsk: Nauka; 1974, 120 p. (In Russ.).

11. Adamenko O.M., Dolgushin I.Yu., Ermolov V.V., Isaeva L.L., Kozlovskaya S.F., Leonov B.N., et al. *History of relief development in Siberia and the Far East. Plateaus and lowlands of Eastern Siberia*. Moscow: Nauka; 1971, 323 p. (In Russ.).

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

13. Meshcheryakov Yu.A. *Morphostructure of flat-platform areas*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1960, 112 p. (In Russ.).

14. Kuranicheva A.I., Lankin Yu.K., Naumova O.O., Verkhovina E.S. Formation features of the Svirsk fresh groundwater deposit. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):190-200. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-190-200>. EDN: WUXDVG.

#### Информация об авторе / Information about the author



**Кураничева Анна Игоревна**,  
инженер лаборатории геологии нефти и газа,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
[kuranicheva.ai@mail.ru](mailto:kuranicheva.ai@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0004-2141-4410>

**Anna I. Kuranicheva**,  
Engineer at Oil and Gas Geology Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
[kuranicheva.ai@mail.ru](mailto:kuranicheva.ai@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0004-2141-4410>

#### 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 27.08.2024; одобрена после рецензирования 03.09.2024; принята к публикации 12.09.2024.

The article was submitted 27.08.2024; approved after reviewing 03.09.2024; accepted for publication 12.09.2024.



## ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 550.8.05:550.853:550.856

EDN: VOUMMB

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301



### Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород

И.В. Матвеева<sup>a✉</sup>, Т.О. Шигарова<sup>b</sup>, О.А. Матвеев<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель данного исследования заключалась в сопоставлении и корректировке результатов прогноза устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского золоторудного месторождения по различным методикам оценки состояния массива горных пород на основе анализа: только структурных параметров, многопараметрической классификации структурных параметров и инженерно-геологических показателей по З.Т. Беньявски и распределения массовой трещиноватости. Для оценки инженерно-геологических условий глубоких горизонтов месторождения использовались данные, полученные в процессе геомеханической документации ядра при проходке разведочных и гидрогеологических скважин и документации стенок подземных горных выработок. Это позволило оценить степень раздробленности пород массива, влияющую на устойчивость подземных горных выработок. По отобраным пробам пород из ядра разведочных скважин и горных выработок выполнен полный комплекс определений физико-механических и деформационных свойств. Всего в течение полевого сезона отобрано и проанализировано 184 пробы и выделено 10 разновидностей пород, характеризующихся различной прочностью, и, как следствие, степенью устойчивости. Проведенный сравнительный анализ на примере Ирокиндинского месторождения позволяет говорить о необходимости комплексного применения этих методик с целью повышения достоверности результатов и максимально корректного определения класса устойчивости горного массива для проходки в нем горной выработки. Результаты, полученные по различным методикам, должны рассматриваться как набор сигналов для принятия проектных решений об укреплении горных выработок.

**Ключевые слова:** классификации, массив горных пород, геомеханическая документация, классы устойчивости, инженерно-геологические показатели, трещиноватость, структурные параметры

**Для цитирования:** Матвеева И.В., Шигарова Т.О., Матвеев О.А. Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород // Науки о Земле и недрапользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 289–301. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.

## GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

### Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods

Irina V. Matveeva<sup>a✉</sup>, Tatiana O. Shigarova<sup>b</sup>, Oleg A. Matveev<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The purpose of the study is to compare and adjust the results of stability forecast for Irokinda gold deposit underground mine workings using various estimation methods of rock mass state based on the analysis of structural parameters only, multiparameter classification of structural parameters and engineering-geological indicators according to Z. Bieniawski as well as mass fracturing distribution. Engineering and geological conditions of deposit deep horizons have been estimated using the data obtained under geomechanical description of the core when drilling exploratory and hydrogeological boreholes and description of the walls of underground mine workings. All these made it possible



to estimate the rock mass fragmentation degree, which affects the stability of underground mine workings. A full range of physical, mechanical and deformation property definition was performed using rock samples taken from the core of exploratory boreholes and mine workings. A total of 184 samples have been taken and analyzed during the field season with distinguishing of 10 rock varieties characterized by different strength and stability degree. The comparative analysis conducted on the example of the Irokinda field implies the need of the integrated use of these methods, which will enable increasing of result reliability and most accurate determination of the stability class of the rock mass for its further mining. The results obtained by various methods should be considered as a set of signals for making design decisions on strengthening mine workings.

**Keywords:** classifications, rock mass, geomechanical documentation, stability classes, engineering and geological parameters, fracturing, structural parameters

**For citation:** Matveeva I.V., Shigarova T.O., Matveev O.A. Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):289-301. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.

## Введение

Основную часть площади Ирокиндинского месторождения занимает киндиканская толща архейского возраста, которая представлена парагнейсами, параамфиболитами, кристаллосланцами, кальцифирами и мраморами. Контакты с окружающими образованиями часто тектонические. Вся толща разбита тектоническими нарушениями в виде разрывов различной морфологии и кинематики, зон дробления, расщепления, будинажа и милонитизации с гидротермально-метасоматическими изменениями и бластезом, что существенно влияет на устойчивость подземных горных выработок.

Цель предполагаемого исследования заключалась в сопоставлении методик оценки состояния массива горных пород для корректировки прогноза устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского золоторудного месторождения.

К задачам исследования можно отнести:

- оценку состояния массива горных пород подземных горных выработок по различным методикам;
- построение цифровой модели состояния массива подземных горных выработок с выделением классов устойчивости;
- анализ факторов пространственного изменения устойчивости массива горных пород;
- сопоставление и корректировку классов устойчивости массива горных пород по различным методикам.

Одновременное применение методик для участков со сложными структурно-геологиче-

скими условиями позволит скорректировать общие выводы прогноза устойчивости как в худшую, так и в лучшую сторону [1, 2]<sup>1-5</sup>. При учете гидрогеологических условий, прочностных характеристик и структурных параметров, входящих в методику многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, а также состояния массива горных пород на основе анализа массовой трещиноватости, достоверность прогноза инженерно-геологических условий эксплуатации нижних горизонтов месторождений повышается.

Для обработки полученных данных и построения моделей и разрезов использовалось программное обеспечение AutoCAD и CorelDraw.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись стенки подземных горных выработок НТС-1 с пикета 0-121 и НТС-2 с пикета 0-70 участка Тулуинский и керн 11 скважин, пробуренных из буровой камеры БК-2 с горизонта 940, в которых проведена структурная документация и опробование пород для определения их физико-механических и деформационных свойств.

Эмпирико-аналитический подход к оценке устойчивости по применяемым нами методикам позволяет подробно охарактеризовать состояние горного массива около существующих горных выработок, а также спрогнозировать возможные изменения в будущем [3].

<sup>1</sup> Кузькин В.И., Ярг Л.А., Кочетков М.В. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: Изд-во ВИМС, 2001. 153 с.

<sup>2</sup> Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: учебник для вузов. М.: Недра, 1967. 288 с.

<sup>3</sup> Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. М.: Недра, 1982. 270 с.

<sup>4</sup> Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: John Wiley and Sons, 1989. 251 p.

<sup>5</sup> Кочетков М.В., Кузькин В.И., Ярг Л.А. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: Изд-во ВИМС, 2001. 153 с.



Для оценки состояния подземных горных выработок на Ирокиндинском месторождении нами применялись следующие методики<sup>4,5</sup>:

– методика оценки состояния массива пород на основе анализа структурных параметров (далее «Методика на основе анализа структурных параметров»);

– методика многопараметрической классификации инженерно-геологических показателей, используемых при прогнозной оценке устойчивости выработок по З.Т. Бенявски (далее «Методика многопараметрической классификации З.Т. Бенявски»);

– методика оценки состояния массива горных пород на основе анализа распределения массовой трещиноватости (далее «Методика на основе анализа распределения массовой трещиноватости»).

Для достоверного прогноза состояния горного массива при отработке глубоких горизонтов месторождений необходимо предусматривать совместное применение вышеуказанных методик.

Первая методика детально описана в статье [3] и позволяет оценить устойчивость существующих горных выработок на основе таких структурных параметров, как модуль трещиноватости, коэффициент качественного керна (RQD) и среднее расстояние между трещинами<sup>6</sup> [5–8]. По результатам авторами выделены классы устойчивости от благоприятных (класс А) до весьма неблагоприятных (класс В) для проходки горной выработки. Блоки горного массива авторами отнесены преимущественно к благоприятным для прохождения в нем горной выработки и неблагоприятным, реже к весьма неблагоприятным.

В основе Методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски лежит оценка факторов, характеризующих состояние массивов горных пород, используемых в методике, описанной выше, а также наличие подземных вод и прочностные характеристики<sup>1,5</sup> [9, 10].

Суть оценки заключается в следующем: определенному участку массива горных пород приписывается определенная величина (класс), которая получается в результате оценки основных инженерно-геологических параметров [11, 12]. Для анализа состояния горного массива были проанализированы такие частные параметры, как модуль трещино-

ватости, коэффициент качества керна (RQD), среднее расстояние между трещинами, входящие в Методику оценки состояния массива пород на основе анализа структурных параметров<sup>4</sup>, а также прочность на одноосное сжатие, характеристика особенности трещин, ориентация по отношению к оси выработки и гидрогеологические условия<sup>1</sup>.

Для того, чтобы прогнозировать состояние массива горных пород, методы его разработки и тип крепления, ему присваивается определенный класс, который определяется по величине суммарной балльности, вводится показатель – класс скального массива (в нашем случае – класс блока), являющийся количественной величиной оценки массивов того или иного класса. Конечным результатом работы является разбиение всего горного массива на блоки, имеющие четкие параметры и определенный прогноз устойчивости.

Анализ состояния массива горных пород на основе Методики распределения массовой трещиноватости базируется на выделении групп трещин различной степени предрасположенности к обрушению [13–15]. На полевом этапе создаются таблицы с массовыми замерами трещин по однородным интервалам и общей характеристикой с первичным распределением по системам трещин. Далее происходит выделение групп по двум критериям: углу падения и азимуту простирания трещин. После распределения всех трещин в интервале по двум типам групп составляется итоговая таблица массовой трещиноватости и дается общая характеристика интервала. Результатом применения данной методики является выделение опасных интервалов на фоне всего горного массива.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результатом исследований стал анализ и сопоставление полученных данных. В качестве примера сопоставления методик рассматривается скважина С-11/940. В табл. 1 представлены характеристики массива горных пород, входящие в состав оцениваемых показателей по вышеуказанным трем методикам.

Основными объектами для анализа по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски выбраны блоки, размер которых варьируется от 1 до 10 м, выделенные

<sup>6</sup> Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.





на этапе документации керна скважин, и взаимодействие между ними. Точность полученных данных оценивается в зависимости от частоты проведенного опробования выработки и влияния локальных тектонических элементов на весь массив пород в целом.

Анализ структурных параметров (модуль трещиноватости, RQD и среднее расстояние между трещинами) позволили выявить закономерности в тектоническом состоянии массива (рис. 1, табл. 2) и выполнить их привязку к обобщенной оценке, согласно системе З.Т. Бенявски (табл. 3).

С целью повышения достоверности результатов, полученных по Методике на основе анализа структурных параметров, разработана корреляционная таблица сравнения с классами устойчивости массива горных пород, определенных по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски (табл. 4).

Так, по Методике на основе анализа только структурных параметров, горный массив, определенный как благоприятный для проходки горных выработок, при расширении оцениваемых инженерно-геологических показателей по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, подразделяется на очень хорошую, хорошую и среднюю скалу [16–18].

По результатам выполненных работ составлены разрезы по буровым линиям скважин, на которые нанесены полученные данные по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, и выполнена оценка устойчивости массива прилегающих горных пород, а также присвоен класс скального массива по устойчивости от II до V и дана качественная характеристика состояния массива.

Итогом стало выявление следующих особенностей горного массива. В районе скважин, пройденных из буровой камеры БК-2 горизонта

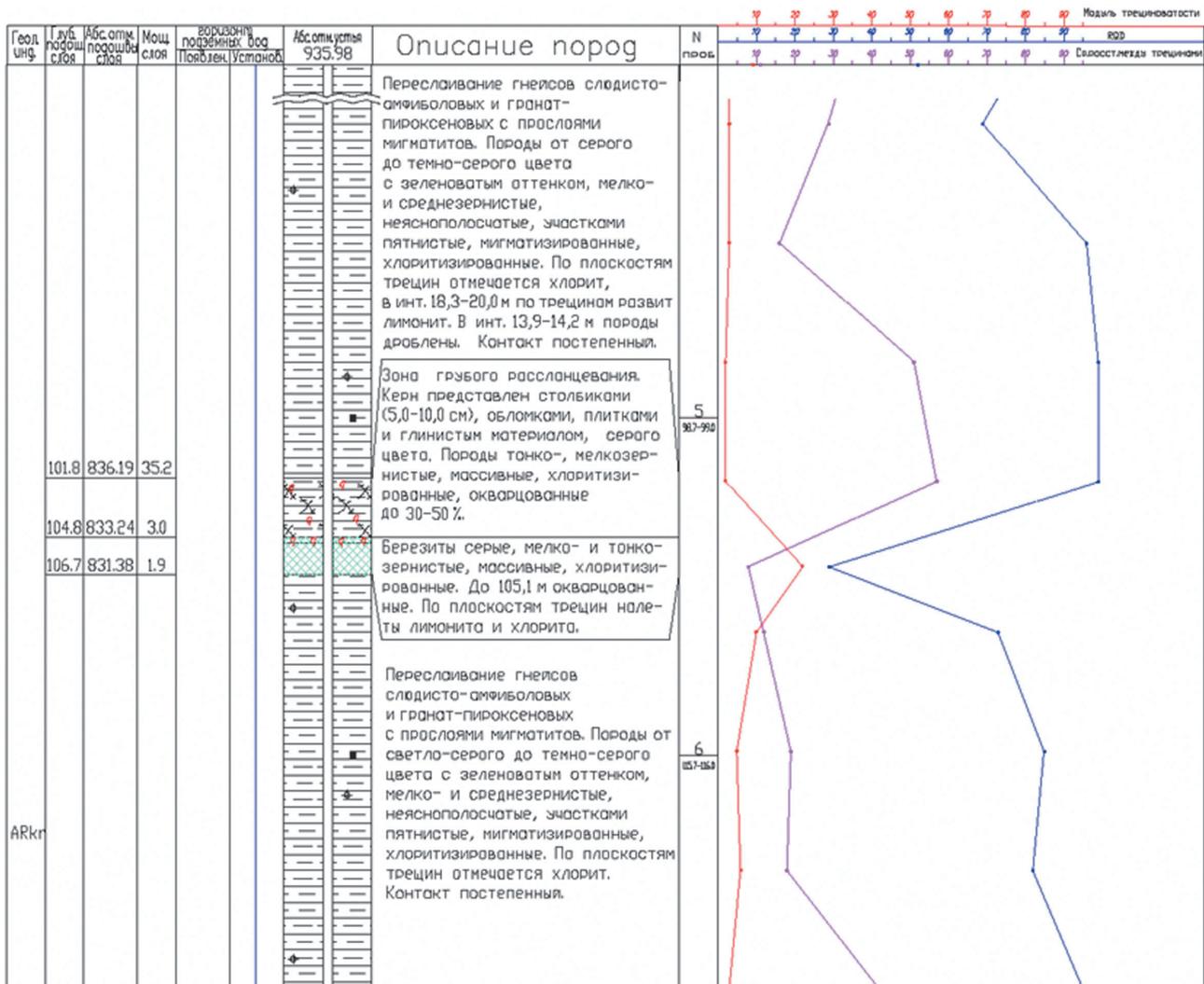


Рис. 1. Фрагмент геологической колонки по скважине С-11/940  
Fig. 1. A fragment of the geological column for C-11/940 well



**Таблица 2. Закономерности тектонического состояния горного массива**  
**Table 2. Regularities of rock mass tectonic state**

Признаки	Описание	Характеристика устойчивости массива пород	Рекомендации по проходке горной выработки
Благоприятные	Резкое увеличение коэффициента RQD и среднего расстояния между трещинами на фоне резкого падения модуля трещиноватости в блоке	Цельный массив, слабо подверженный тектоническим воздействиям. Массивы ограничены крупными тектоническими структурами, негативно влияющими на их устойчивость	Устойчивая горная выработка
	Плавное изменение всех трех параметров при условии, что коэффициент RQD неизменно выше модуля трещиноватости	Спокойный массив горных пород, ненарушенный крупными тектоническими структурами. Чем выше разница между значением RQD и модулем трещиноватости, тем устойчивее будет этот блок	Наличие таких блоков, тянущихся на десятки метров, является важным критерием выбора расположения горных выработок
Неблагоприятные	Резкое увеличение модуля трещиноватости на фоне резкого падения коэффициента RQD и среднего расстояния между трещинами в блоке	Нахождение в пределах массива тектонических нарушений различного генезиса: крупных разломов зон интенсивного расланцевания и дробления, замковых частей складок и т. п.	Участки требуют тщательного изучения на предмет определения причин нарушения сплошности массива, прежде, чем планировать в них горные выработки
	Прерывание показателей (значение 0 или нет данных) говорит о полном разрушении скального массива до состояния щебня, дресвы	Крайне неустойчивое состояние массива	
	Плавное изменение всех трех параметров при условии, что модуль трещиноватости неизменно выше коэффициента RQD на значительное значение (не менее 20 условных единиц по шкале модуля трещиноватости)	Неблагоприятные тектонические условия в массиве, обусловленные четко проявленной сланцеватостью, наличием нескольких постоянных систем трещин и других нарушений сплошности пород, проявляемых по всему массиву	

**Таблица 3. Сопоставление классов устойчивости горного массива**  
**Table 3. Comparison of rock mass stability classes**

Номер класса	Описание основных параметров класса устойчивости по Методике на основе анализа структурных параметров	Соответствие классам по Методике многопараметрической классификации З.Т. Беньявски
A	Блок горного массива благоприятный для прохождения в нем горной выработки. Имеет высокие значения RQD и низкие значения модуля трещиноватости	Соответствует I, II, III классу. Может соответствовать IV классу в случае неизменности структурных показателей относительно соседних блоков. Соответствует второму описанному выше благоприятному признаку
B	Блок горного массива неблагоприятный для прохождения в нем горной выработки. Имеет высокие значения RQD и низкие значения модуля трещиноватости, но малые мощности (меньше 20 м), что не позволяет спроектировать выработку с устойчивой кровлей	Соответствует II, III и IV классу. Соответствует первому описанному выше благоприятному признаку
B	Блок горного массива весьма неблагоприятный для прохождения в нем горной выработки. Имеет высокие значения модуля трещиноватости и низкие значения модуля RQD, что не позволяет спроектировать выработку с устойчивой кровлей	Соответствует IV и V классу. Соответствует каким-либо из описанных трех неблагоприятных признаков



Таблица 4. Корреляционная таблица классов устойчивости массива горных пород

Table 4. Rock mass stability class correlation table

Класс устойчивости по Методике на основе анализа структурных параметров		Условный цвет	Класс устойчивости по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски	
Благоприятный	А		I	Очень хорошая скала
			II	Хорошая скала
			III	Средняя скала
Неблагоприятный	Б		IV	Плохая скала
Весьма неблагоприятный	В		V	Очень плохая скала

940, выделено несколько наиболее неблагоприятных горизонтов, в пределах которых резко повышается вероятность ухудшения устойчивости горного массива. К наиболее неустойчивым можно отнести горизонты: 840-820; 800-760 и 710-670. Несмотря на общий неблагоприятный фон на отмеченных выше горизонтах на одних глубинах могут встречаться

как классы устойчивости II (хорошая скала), так и V (очень плохая скала), что говорит о высокой степени влияния тектонических структур (рис. 2).

Состояние горного массива можно назвать линейно изменчивым. Большинство отмеченных зон низкой устойчивости имеют четкий линейный характер, что связано с их тектони-

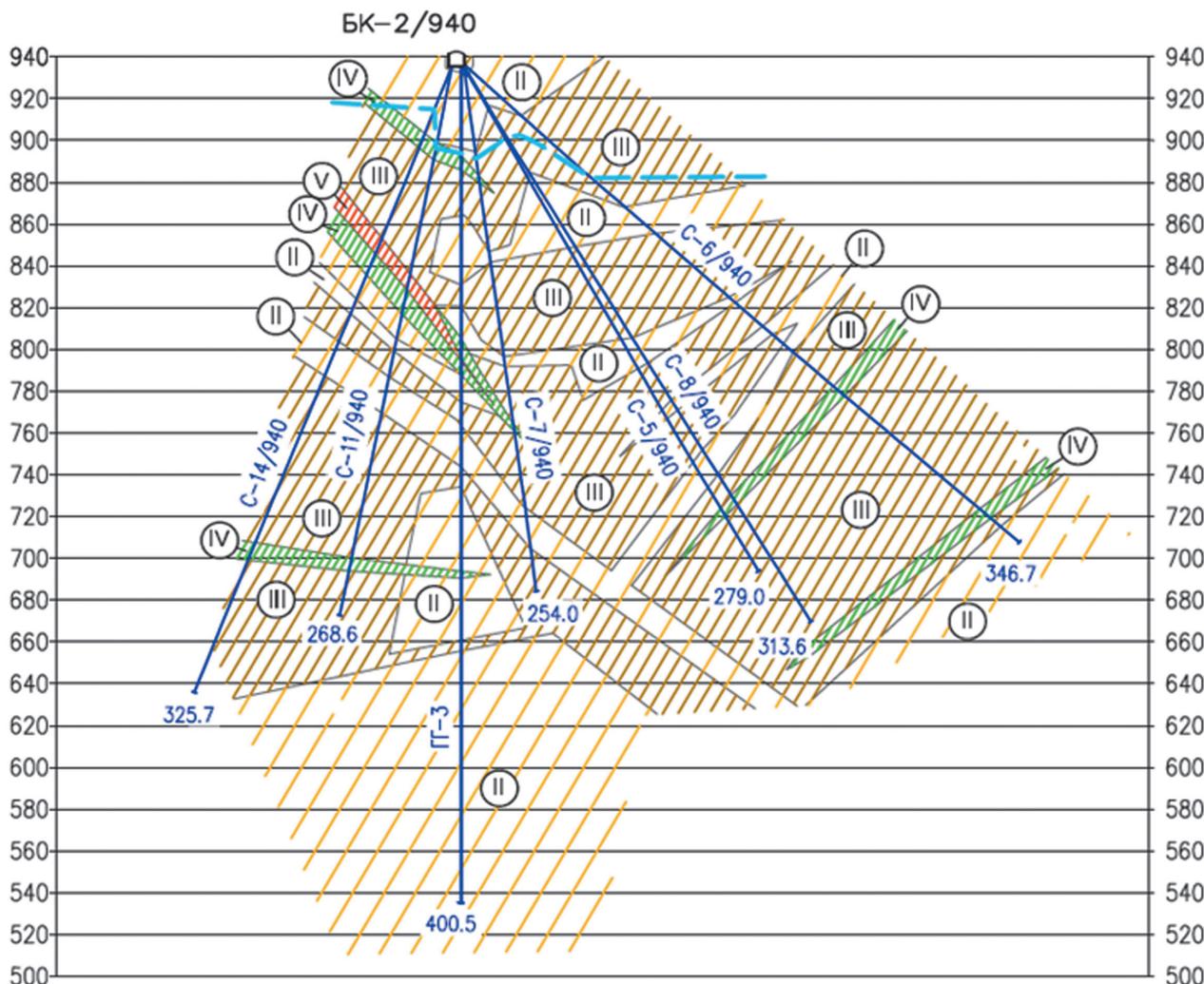


Рис. 2. Геологической разрез по буровой линии с нанесенными классами устойчивости горного массива по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски

Fig. 2. Geological section along the drilling line with the plotted rock mass stability classes according to Z. Bieniawski method of multiparameter classification



ческим происхождением. Можно отметить две главные тектонические системы с направлением падения на северо-восток и юго-запад. Углы падения этих систем – 50–75°, слабоустойчивые и неустойчивые.

Большой вклад в низкую устойчивость горного массива вдоль линейных ослабленных зон вносит их обводненность. Абсолютные отметки уровня подземных вод сильно отли-

чаются в скважинах (на десятки метров), что говорит о преимущественно трещинно-жильном характере вод.

Корреляционная сопоставимость классов устойчивости массива горных пород скважины С-11/940 по Методике на основе анализа структурных параметров и Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски показана на рис. 3.

Абс. отм., м	Модуль трещиноватости, RQD, среднее расстояние между трещинами	Класс устойчивости по Методике на основе анализа структурных параметров	Класс устойчивости по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски	Типовые фото керна, соответствующие классам устойчивости горных пород
940		А	III, II	
920				
900				
880		Б	II, IV, III	
860		А	III	
840		Б	III	
820		В	V, IV	
800		Б	III, II	
780		А	II, III	
760				
740		Б	III, IV	
720		А	III	
700				
680				
660				

**Рис. 3. Результаты корреляционной сопоставимости классов устойчивости массива горных пород по скважине С-11/940**  
**Fig. 3. Results of correlation comparability of rock mass stability classes for C-11/940 well**



Полученный результат позволяет наглядно сопоставить результаты по двум методикам. Так, блоки пород с благоприятными условиями (класс А) соответствуют II и III классам, определенным по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски. Блоки с неблагоприятными условиями (класс Б), согласно полученным показателям физико-механических свойств, включенных в Методику многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, отнесены к II и III классам (хорошая и средняя скала). Таким образом, при учете прочностных характеристик, полученных в результате лабораторных исследований, класс устойчивости массива повышен. В интервале 840–820 м скважиной С-11/940 вскрыта зона дробления, массив горных пород в пределах которой, согласно обоим методикам, относится к весьма неблагоприятным (классы В и IV–V). Для этого интервала характерно увеличение значения модуля трещиноватости и понижение значений модуля RQD и среднего расстояния между трещинами вплоть до пересечения между собой графиков показателей, что не позволяет спроектировать выработку с устойчивой кровлей.

Особое внимание стоит обратить на горизонты, где показатели двух методик расходятся. Такая ситуация обусловлена двумя причинами:

1. Структурные показатели говорят о монолитном слабо трещиноватом массиве, а Методика многопараметрической классификации З.Т. Бенявски дает плохой прогноз, учитывая низкие физико-механические характеристики пород, общую выветрелость массива или наличие осложнений в виде воды, мягкого заполнителя трещин и др.

2. Обратная ситуация, когда низкие структурные показатели, полученные по Методи-

ке многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, нивелируются высокими значениями прочности пород и другими характеристиками, что в конечном итоге дает благоприятную оценку массива.

Обе описанные ситуации рекомендуется рассматривать по самой отрицательной оценке и присваивать массиву горных пород более низкий класс устойчивости.

Также для корректировки классов, выделенных по вышеописанным двум методикам, могут быть использованы классы устойчивости, выделенные согласно Методике оценки состояния массива горных пород на основе анализа распределения массовой трещиноватости.

После распределения всех трещин в интервале по двум типам групп: углу падения относительно угла наклона ствола выработки и углу между азимутами простирания выработки и системы трещин, составляется итоговая таблица распределения массовой трещиноватости и дается общая характеристика интервала (табл. 5).

Для классификации устойчивости массива пород по данной методике в каждую клетку записывается значение количества трещин, попавших в общую группу (по углу падения и азимуту простирания). Основанием для отнесения отдельного интервала к какому-либо классу устойчивости служит преодоление 50 % порога в распределении массовых замеров трещин.

Использование данной методики показывает хорошие результаты при уточнении классов устойчивости горных пород, полученных по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски.

Применение Методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски в су-

**Таблица 5. Классификация устойчивости массивов горных пород по Методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости**

**Table 5. Classification of the stability of rock masses according to the Methodology based on the analysis of the distribution of mass fracturing**

Наименование класса устойчивости (по углу падения относительно угла наклона ствола выработки) / наименование подкласса устойчивости (по углу между азимутами простирания выработки и системы трещин)	Благоприятный (-60...120° и +60...120°)	Неблагоприятный (-30...59° и +30...59°) (-121...150° и +121... 50°)	Весьма неблагоприятный (0–29° и 0–29°) (-151...180° и +151...180°)
Устойчивый (0–29°)	Ia	Iб	Iв
Слабоустойчивый (30–59°)	IIa	IIб	IIв
Неустойчивый (60–90°)	IIIa	IIIб	IIIв



**Таблица 6. Сопоставление классов устойчивости горного массива по трем методикам**  
**Table 6. Comparison of rock mass stability classes using three methods**

Методика на основе структурных параметров		Методика многопараметрической классификации З.Т. Бенявски		Методика на основе анализа распределения массовой трещиноватости		
Класс	Наименование класса	Класс	Наименование класса	Класс	Наименование подкласса	Наименование класса
А	Благоприятный	I	Очень хорошая скала	Ia	Благоприятный	Устойчивый
		II	Хорошая скала	Ib	Весьма неблагоприятный	Устойчивый
				Iб	Неблагоприятный	Устойчивый
		III	Средняя скала	IIб	Неблагоприятный	Слабоустойчивый
Б	Неблагоприятный	IV	Плохая скала	IIa	Благоприятный	Слабоустойчивый
				IIIa	Благоприятный	Неустойчивый
В	Весьма неблагоприятный	V	Очень плохая скала	IIв	Весьма неблагоприятный	Слабоустойчивый
				IIIв	Весьма неблагоприятный	Неустойчивый
				IIIб	Неблагоприятный	Неустойчивый

существующих горных выработках дает очень усредненную картину в силу высокого влияния механического воздействия на породы при проходке ствола выработки. Наличие большого количества открытых мелких трещин на стенках выработки, проявившихся при взрывных работах и механизированной проходке, занижает основные структурные показатели системы (RQD и среднее расстояние между трещинами), что приводит к систематическому занижению класса устойчивости, то есть ухудшению прогноза устойчивости.

Частым явлением при применении Методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски на существующие горные выработки является наличие обширных областей с классами устойчивости IV и V, то есть прогнозное безаварийное существование такой выработки без специальных систем крепи не превышает суток, что не всегда подтверждается фактическими наблюдениями. Или обратный случай, когда вертикальные системы трещин с простираем параллельным оси выработки дают неоправданно хорошие показатели. В таких случаях для более точного прогноза необходимы дополнительные исследования горных выработок для уточнения класса устойчивости массива горных пород по Методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости.

При одновременном исследовании одних и тех же блоков массива горных пород, по описанным выше трем методикам, получается

следующая картина сопоставления классов устойчивости (табл. 6).

Приведенная выше таблица сравнения методик оценки устойчивости существующих горных выработок позволяет скорректировать общие выводы прогноза устойчивости как в худшую, так и в лучшую сторону. Так, часто прогноз устойчивости по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски показывает плохие результаты, несоответствующие реальной геологической ситуации. В этом случае, на основе сопоставления результатов по разным методикам, мы можем откорректировать окончательный класс устойчивости в сторону увеличения. Таким образом, плохая скала с классом IV по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски (класс Б по Методике на основе структурных параметров), может быть отнесена к классу IIIa (благоприятная, неустойчивая) согласно Методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости (см. табл. 1).

### Заключение

Проведенный сравнительный анализ вышеописанных методик позволяет говорить о необходимости их комплексного применения с целью максимально корректного определения класса устойчивости горного массива для прохождения в нем горной выработки. При этом на начальных стадиях разработки во избежание больших дополнительных затрат



достаточно оценки состояния массива горных пород на основе анализа только структурных параметров, так называемой рейтинговой классификации<sup>1</sup>.

На ключевых участках со сложными структурно-геологическими условиями для корректировки общих выводов прогноза устойчивости необходимо одновременное применение всех вышеописанных методик. При этом возникает необходимость выполнения допол-

нительных полевых исследований по четко оговоренным методикам: ориентированное бурение разведочных скважин, отбор монолитов ненарушенного сложения и лабораторные исследования физико-механических и деформационных свойств грунтов. И, как следствие, все полученные результаты должны рассматриваться как набор сигналов для принятия проектных решений об укреплении горных выработок на конкретных участках.

#### Список источников

1. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 4. С. 201–202. EDN: INTNKV.
2. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Самообрушение руды при подземной добыче. М.: Изд-во МГГУ, 2006. 283 с.
3. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия уральского государственного горного университета. 2021. № 4. С. 109–115. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-109-115>. EDN: ELNONZ.
4. Чернов А.Ю., Бузов С.А. Применение рейтинговых классификаций массивов горных пород на основе общепринятой системы документации горных выработок // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (г. Пермь, 2–4 апреля 2019). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. С. 603–608. EDN: ZCOYLR.
5. Deere D.U., Deere D.W. The Rock quality designation (RQD) index in practice // Rock Classification Systems for Engineering Purposes / ed. L. Kirkaldie. West Conshohocken: ASTM International, 1988. P. 91–101. <https://doi.org/10.1520/STP48465S>.
6. Terzaghi R.D. Sources of error in joint surveys // Geotechnique. 2009. Vol. 15. Iss. 3. P. 287–304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>.
7. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support // Rock Mechanics and Rock Engineering. 1974. Vol. 6. Iss. 4. P. 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
8. Haines A., Terbrugge P., Carrieri G. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems // Proc. 7<sup>th</sup> Cong. on Rock Mechanics (Aachen, 16–20 September 1991). Aachen: A.A. Balkema, 1991. Vol. 2. P. 887–892. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92931-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92931-F).
9. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: John Wiley and Sons, 1989. 251 p.
10. Romana M. New adjustment rating for application of the Bieniawski classifications to slopes // Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics (Zacatecas, 1985). Zacatecas: International Society of Rock Mechanics, 1985. P. 49–53.
11. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов горных пород и их практическое применение // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 5. С. 181–185. EDN: ICJNJJ.
12. Рыбин В.В., Губинский Н.О. Определение рейтинга массива горных пород по классификации Д. Лобшира для условий карьеров ОАО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 3. С. 140–143. EDN: PUXDSF.
13. Laubscher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1990. Vol. 90. P. 257–273.
14. Jacubec J., Laubscher D. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice // MassMin (Brisbane, 29 October – 2 November 2000). Brisbane, 2000. P. 413–421.
15. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses // Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories / eds. W.A. Hustrulid, R.L. Bullock. Littleton: SME, 2001. P. 455–463.
16. Bieniawski Z.T. Determining rock mass deformability: experience from case histories // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1978. Vol. 15. Iss. 5. P. 237–247. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90956-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90956-7).
17. Nicholson G.A., Bieniawski Z.T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification // International Journal of Mining and Geological Engineering. 1990. Vol. 8. P. 181–202. <https://doi.org/10.1007/BF01554041>.
18. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002. Vol. 39. Iss. 2. P. 185–216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4).

#### References

1. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. Rating classifications of rock masses: formation background, development and application field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2004;4:201-202. (In Russ.). EDN: INTNKV.



2. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. *Self-destruction of ore during underground mining*. Moscow: Moscow State Mining University; 2006, 283 p. (In Russ.).
3. Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical techniques for assessing rock massif condition. *News of the Ural State Mining University*. 2021;4:109-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-109-115>. EDN: ELNONZ.
4. Chernov A.Y., Buzov S.A. Using rock mass rating classifications based on the mining customary documentation system. In: *Sergeevskie chteniya: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii = Sergeev Readings: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. 2–4 April 2019, Perm. Perm: Perm State University; 2019, p. 603-608. (In Russ.). EDN: ZCOYLR.
5. Deere D.U., Deere D.W. The Rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie L. (ed.). *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. West Conshohocken: ASTM International; 1988, p. 91-101. <https://doi.org/10.1520/STP48465S>.
6. Terzaghi R.D. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*. 2009;15(3):287-304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>.
7. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1974;6(4):189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
8. Haines A., Terbrugge P., Carrieri G. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems. In: *Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics*. 16–20 September 1991, Aachen. Aachen: A.A. Balkema; 1991, vol. 2, p. 887-892. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92931-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92931-F).
9. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York: John Wiley and Sons; 1989, 251 p.
10. Romana M. New adjustment rating for application of the Bieniawski classifications to slopes. In: *Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics*. Zacatecas, 1985. Zacatecas: International Society of Rock Mechanics; 1985, p. 49-53.
11. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. Rating classifications of rock masses and their practical application. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2005;5:181-185. (In Russ.). EDN: ICJNJJ.
12. Rybin V.V., Gubinsky N.O. Defining rock mass rating according to D. Lobshir's classification for Apatit OJSC open pit conditions. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2012;3:140-143. (In Russ.). EDN: PUXDSF.
13. Laubscher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990;90:257-273.
14. Jacubec J., Laubscher D. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice. In: *MassMin*. 29 October – 2 November 2000, Brisbane. Brisbane; 2000, p. 413-421.
15. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid W.A., Bullock R.L. (eds). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories*. Littleton: SME; 2001, p. 455-463.
16. Bieniawski Z.T. Determining rock mass deformability: experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978;15(5):237-247. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90956-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90956-7).
17. Nicholoso G.A., Bieniawski Z.T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Mining and Geological Engineering*. 1990;8:181-202. <https://doi.org/10.1007/BF01554041>.
18. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002;39(2):185-216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4).

#### Информация об авторах / Information about the authors



##### **Матвеева Ирина Викторовна,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
заместитель руководителя департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [matveeva.i.2010@mail.ru](mailto:matveeva.i.2010@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>

##### **Irina V. Matveeva,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Deputy Head of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [matveeva.i.2010@mail.ru](mailto:matveeva.i.2010@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>



**Шигарова Татьяна Олеговна,**

инженер департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
shigarova@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>

**Tatiana O. Shigarova,**

Engineer of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
shigarova@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>



**Матвеев Олег Александрович,**

ведущий инженер департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
matveev\_oleg68@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>

**Oleg A. Matveev,**

Lead Engineer of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
matveev\_oleg68@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

И.В. Матвеева – написание текста.

Т.О. Шигарова – подготовка рисунков и таблиц, перевод на английский язык.

О.А. Матвеев – полевые исследования и камеральная обработка полевых материалов.

Irina V. Matveeva wrote the text of the article.

Tatiana O. Shigarova prepared figures and tables, translated the article into English.

Oleg A. Matveev performed field research and office analysis of field materials.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

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

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 28.08.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 20.09.2024.

The article was submitted 28.08.2024; approved after reviewing 10.09.2024; accepted for publication 20.09.2024.



## ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Научная статья

УДК 550.822.7

EDN: CGZXIF

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-302-315

**Анализ особенностей строительства эксплуатационных скважин  
в условиях многолетнемерзлых пород****В.И. Зайцев<sup>a✉</sup>, А.В. Карпиков<sup>b</sup>**<sup>a,b</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

**Резюме.** Цель данного исследования заключалась в представлении результатов анализа особенностей строительства и эксплуатации скважин на нефть и газ в условиях многолетнемерзлых пород. При рассмотрении соответствующих данной теме материалов применялся метод сравнительного анализа. Объектом исследований являлись технологии и оборудование, применяемые для качественного и быстрого строительства глубоких скважин в условиях многолетнемерзлых пород. В результате происходят осложнения и аварии в виде обрушения стенок скважины, наличия каверн, прихватов, смятия обсадных колонн и просадки устьевого оборудования. Замечено, что наиболее неустойчивые породы в разрезах многолетнемерзлых пород находятся в интервале 0–200 м. Проведен анализ влияния температуры на интенсивность теплового взаимодействия в системе «промывочный агент – устье скважины – бурильная (эксплуатационная) колонна». Установлено, что основным способом предотвращения осложнений при бурении многолетнемерзлых пород является сохранение отрицательной температуры стенок скважины. Рассмотрено применение термоизолирующих обсадных труб для формирования направляющей колонны скважины. Отмечено, что в качестве основного способа при бурении криолитозоны целесообразно использовать роторный способ, а бурение под шахтовое направление осуществлять с помощью шнека без применения промывки. Установлено, что в бурении при использовании буровых растворов приходится решать проблему предупреждения замерзания раствора при длительном прекращении промывки. Учитывая, что зона многолетнемерзлых пород, как правило, состоит из рыхлых, неустойчивых пород, большое значение имеет продолжительность бурения под кондуктор, которая должна быть не более трех суток. За это время при применении качественного глинистого раствора с температурой от 0,5 до 2,5 °С осложнений почти не бывает. Исследована реальная возможность использовать в качестве очистного агента буровой раствор с отрицательной температурой, а также его же с положительной температурой, но с применением дополнительных специальных технологий. Признано, что применение буровых растворов с отрицательной температурой неэкономично. Установлено, что для предупреждения растепления многолетнемерзлых пород недостаточно только предварительного охлаждения циркулирующего раствора, необходимо также при проектировании режима бурения выбирать повышенные значения частоты вращения и осевой нагрузки на забой при одновременном изменении количества подаваемой в скважину жидкости. Рассмотрены варианты реализации технологии бурения буровых растворов с увеличением его степени минерализации. Отмечено, что если степень минерализации буровых растворов и поровой воды многолетнемерзлых пород одинакова, то система «скважина – порода» будет находиться в изотоническом равновесии.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, бурение, буровой раствор

**Для цитирования:** Зайцев В.И., Карпиков А.В. Анализ особенностей строительства эксплуатационных скважин в условиях многолетнемерзлых пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 302–315. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-302-315>. EDN: CGZXIF.

## TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF GEOLOGICAL EXPLORATION

Original article

**Analysis of production well construction features  
in permafrost conditions****Vitaly I. Zaitsev<sup>a✉</sup>, Alexander V. Karpikov<sup>b</sup>**<sup>a,b</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** The purpose of the research is to present the analysis results of construction and operation features of oil and gas wells in permafrost conditions. Considering the materials relevant to this topic, the method of comparative analysis is

© Зайцев В.И., Карпиков А.В., 2024



applied. The object of the research is technologies and equipment used for high-quality and fast construction of deep wells in permafrost conditions. As a result, complications and accidents occur due to the collapse of well walls, occurrence of caverns, stuck pipes, casing deformation and subsidence of wellhead equipment. It is noticed that the most unstable rocks in permafrost sections are located in the range of 0–200 m. The effect of temperature on thermal interaction intensity in the "flushing agent – wellhead – drill (production) string" system is analyzed. It is found out that maintaining negative temperature of well walls is the main way to prevent complications while drilling in permafrost. The use of thermally insulating casing pipes to form a well conductor string is considered. The rotary method is specified as the main drilling method in the cryolithozone while auger without flushing is relevant for drilling for shaft direction. It is determined that drilling with the use of drilling fluids has to solve the problem of solution freezing prevention when flushing has been stopped continuously. Taking into account that the permafrost zone, as a rule, consists of loose, unstable rocks, the great importance is given to the duration of drilling under the conductor, which should last not more than 3 days. During this time, almost no complications occur when using high-quality clay mud with the temperature in the range from 0.5 to 2.5 °C. The real possibility of using a drilling fluid with a negative temperature as a cleaning agent, as well as the same with a positive temperature, but with the use of additional special technologies, is investigated. The use of drilling fluids with a negative temperature is recognized to be not economical. It is specified that prevention of permafrost rock thawing requires not only pre-cooling of the circulating solution but also selection of increased values of the rotation frequency and axial load on the bottomhole with a simultaneous change in the amount of fluid supplied to the well when designing the drilling mode. Consideration is given to the implementation options of the drilling technology based on increasing mineralization degree of drilling fluids. A conclusion is drawn that "well – rock" system is in isotonic equilibrium if the mineralization degree of drilling fluids and pore water of permafrost rocks is the same.

**Keywords:** permafrost, drilling, drilling mud

**For citation:** Zaitsev V.I., Karpikov A.V. Analysis of production well construction features in permafrost conditions. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):302-315. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-302-315>. EDN: CGZXIF.

## Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) занимают более 60 % территории России. Суровый климат и широкое распространение многолетней мерзлоты налагают особые требования к строительству и эксплуатации скважин. Мощность мерзлых пород на севере может достигать более одного километра. В летний период мерзлые породы оттаивают на 0,5+2 м. Мерзлые породы создают большие трудности для строительства скважин. Особенно степень осложнения зависит от таких условий строительства скважины, как категория распространения (сплошное, прерывистое и др.), вида крипогенной структуры (массивная, слоистая и др.), степени льдистости и температуры горных пород. Вопрос льдистости изучен меньше всего. В составе ММП может находиться незамерзающая вода с различной степенью минерализации. Количество этой воды зависит от температуры, вещественного состава и солёности. На сегодняшний день в процессе строительства нефтяных и газовых скважин, в частности на этапе бурения горных пород, существует множество факторов, способных привести к осложнениям и даже к тяжёлым авариям. Одним из таких факторов является наличие сцементированных льдом горных пород в верхних интервалах бурения, которые не оттаивают на протяжении долгих лет, иначе говоря, существуют многолетнемерзлые горные породы. Во время бурения данных интервалов возможно их растепле-

ние, что приводит к нежелательным осложнениям, таким как:

- интенсивное кавернообразование в интервалах залегания ММП, осыпи, обвалы, прихваты, слом инструмента, размыв и провал фундамента буровой установки;
- протаивание, размыв ММП за направлением, кондуктором, проникновение бурового раствора (БР) в затрубное пространство, потеря циркуляции в стволе, грифонообразование;
- проблемы спуска обсадных колонн до проектной глубины, недоподъём цемента, разгерметизация их, а также возможное смятие в случае обратного промерзания;
- выдавливание и возможные выбросы БР, воды, газа из-за наличия зажатых между мерзлых вод пропластков гидратов.

Основным способом предотвращения осложнений при бурении в ММП является сохранение отрицательной температуры стенок скважины. Для этой цели применяются различные буровые промывочные агенты: начиная от охлажденного воздуха и устойчивой пены и заканчивая БР на водной или другой основе. Если БР будет иметь повышенную по сравнению с поровой водой концентрацию какой-нибудь растворенной соли, то на границе лед – жидкость начнутся фазовые превращения, связанные с понижением температуры плавления льда, что приведет к потере устойчивости стенок скважин. Так как устойчивость стенки скважины зависит в основном от льда



как цементирующего породу вещества, то в этих условиях устойчивость ММП, слагающих стенку скважины, будет потеряна, что может явиться причиной выше перечисленных осложнений. Так как борьба с растеплением устья скважин идет с переменным успехом, специалисты стали применять в последнее время различные технические средства, предотвращающие оттаивание ММП при бурении скважин.

Это очень важно, так как любое нарушение теплового режима многолетнемерзлых грунтов при строительстве скважин приводит к возникновению аварийных ситуаций с серьезными экономическими, материально-техническими, экологическими и социальными последствиями.

### **Материалы и методы исследования**

В ходе исследования авторы анализировали опубликованные работы по кинетике разрушения льда и мерзлой породы, циркулирующей промывочной жидкости, взаимодействующей как с жидкостью и породой, так и со льдом. Изучались причины осложнений и аварий при строительстве и эксплуатации скважин вследствие теплового воздействия на ММП [1]. При аналитическом исследовании рассматривалась вертикальная скважина, проходящая сквозь толщу ММП, в которой породы однородны и изотропны, плотность мерзлой породы равна плотности талой. Температура по толщине каждой обсадной колонны принималась неизменной. В работе рассмотрена математическая модель вертикальной скважины, имеющей четырехслойную крепь и состоящей из обсадных колонн и цементных оболочек с различной теплопроводностью [2]. При этом получены численные оценки изменения температуры в многослойной крепи при использовании различных тампонажных материалов. Результаты расчетов показали, что даже при применении тампонажных материалов с низкой теплопроводностью все равно происходит оттаивание около скважинной зоны ММП, и вопрос заключается только в сроках протаивания грунта вокруг скважины и времени потери им устойчивости. Определены рекомендации по предупреждению растепления стенок скважин и их вторичного промерзания с последующим прихватом обсадной колонны и даже ее слома. Анализировалось применение

низкотемпературных полимерглинистых растворов с противоморозными добавками и водогипановых растворов для бурения пород с отрицательными температурами. К сожалению, водогипановые растворы подходят только для удаления выбуренных частиц породы. Изучались новые технологии бурения в ММП и специальное оборудование, в том числе зарубежное. Анализировалось применение термоизолирующего направления в виде термокейса и коаксиальных труб, устройство для охлаждения пластовым газом, холодильные агрегаты для охлаждения БР, термостабилизаторы на основе модуля Пельтье и другие, скважинные влагоотделители, система вертикальной естественно действующей трубчатой (ВЕТ) для термостабилизации устья скважины.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Целью статьи является анализ особенностей строительства скважин в условиях ММП и рекомендации на основе анализа практикуемых технологий.

Технология строительства скважин в зонах распространения ММП должна определяться мерзлотными и климатическими условиями данной территории. Вводу площадей в бурение должно предшествовать создание детальных мерзлотных карт, на которых отражены поверхностные условия всего разреза ММП. Территория месторождения разбивается на участки с однотипными параметрами ММП [3, 4].

В процессе бурения скважин в толще ММП встречается ряд специфичных осложнений, которые нередко приводят к серьезным авариям: выпучиванию грунта, разрушению устья скважин, обвалам стенок скважин, обрыву и смятию обсадных колонн из-за неэффективного цементирования в зоне мерзлых пород, выбросу газа на поверхность, грифонам и т. д. [5, 6]. Главными факторами, определяющими степень влияния многолетней мерзлоты на проводку скважин, являются физико-химические, механические свойства мерзлых пород, температура промывочной жидкости [7].

Во время бурения скважин лед, заполняющий поры, при оттаивании мерзлых пород переходит в жидкую фазу, занимающую меньший объем, а образовавшуюся пустоту заполняет промывочная жидкость положительной температуры, происходит дальнейшее отта-



ивание пород. Силы сцепления между частицами рыхлых пород резко уменьшаются, что ведет к осыпанию или обвалам стенок скважины.

Технология бурения мерзлых толщ, представленных твердыми крепкими породами низкой проницаемости, практически идентична бурению в таких же породах с положительной температурой, в то время как строительство скважин в зоне мерзлоты, представленной преимущественно льдистыми, слабосцементированными, рыхлыми породами, резко отличается от строительства скважин в аналогичных породах с положительной температурой [8].

В этом случае основную роль в нормальной проводке ствола скважины играют температурный режим промывки скважины и продолжительность бурения толщи ММП, то есть факторы, оказывающие решающее влияние на растепление стенок скважины [9].

Радиус зоны растепления тем больше, чем выше температура промывочной жидкости и продолжительность ее воздействия. Нередко радиус зоны растепления достигает нескольких метров.

При длительном простое скважины отрицательные температуры в пристволевой зоне восстанавливаются. При замерзании воды в этой зоне возможно повреждение обсадной колонны, если последняя спущена в скважину (смятие или обрыв) [10].

Поэтому обсадные колонны в интервалах залегания ММП должны состоять из труб, выдерживающих давления, которые возникают при обратном промерзании затрубных и межтрубных пространств. При использовании труб меньшей прочности должны осуществляться специальные мероприятия (управляемое замораживание затрубного пространства, периодические прогревы и др.), предотвращающие смятие колонн и нарушение резьбовых соединений при обратном промерзании.

Основным способом предотвращения названных осложнений в мерзлых породах является сохранение отрицательной температуры стенок скважины. Это может быть достигнуто охлаждением промывочной жидкости до температуры  $-2...-5$  °С. Можно свести к минимуму растепление пород, если бурить с продувкой воздухом или с промывкой охлажденной азрированной жидкостью, пенами. Полезной практикой при бурении в мерзлых

породах является использование долота уменьшенного диаметра: к тому времени как скважина будет пробурена до глубины, на которую нужно спустить обсадную колонну, диаметр скважины вследствие растепления увеличится до нужного для этого размера. После разбуривания всей толщи мерзлых пород ствол скважины необходимо укрепить обсадной колонной и тем самым исключить возможность дальнейшего осыпания пород. Башмак этой колонны следует устанавливать в прочных породах, не осыпающихся при растеплении. На 50 м ниже глубины промерзания кольцевое пространство между колонной и стенками скважины, если они сложены непроницаемыми породами при положительной температуре, полезно герметизировать пакером устанавливаемым в 10–20 м от башмака, особенно в газовых и газоконденсатных скважинах. Это позволит предотвратить прорыв газа в заколонное пространство и образование грифонов вокруг устья скважин, что часто наблюдается при растеплении мерзлых пород [5, 6].

*Буровые растворы, используемые при бурении в многолетнемерзлых породах.* Бурение в ММП возможно с использованием в качестве очистного агента:

- БР с отрицательной температурой;
- охлажденного воздуха, азрированных жидкостей, пен;
- БР с положительной температурой, но с применением специальных технологий [3].

В первом случае могут быть использованы растворы как на углеводородной, так и на водной основе. В качестве противоморозных добавок в водные растворы вводятся NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>. С повышением их концентрации температура замерзания раствора снижается и может быть доведена до  $-16$  °С. Однако при этом возрастает скорость растворения льда. Для получения требуемых свойств в раствор вводятся глино-порошок, гипан, КМЦ, ПДА. Однако введение противоморозных добавок существенно снижает стабильность растворов, в результате происходит их разделение на твердую и жидкую фазы. Кроме того, в летнее время охлаждение раствора до отрицательных температур затруднено [11].

В районах Севера и Северо-Востока могут применяться промывочные жидкости в виде пресных растворов с малым содержанием твердой фазы и малоглинистые. Для буре-



ния неглубоких скважин в качестве очистного агента применяются воздух, азрированные растворы и пены.

К тому же пены и азрированные жидкости используются по незамкнутой схеме циркуляции, это создает определенные трудности.

В целом применение в качестве очистных агентов жидкостей с отрицательной температурой, азрированных жидкостей и пен практически всегда невозможно при бурении основной части ствола глубокой скважины, замена их БР после проходки ММП приводит к существенному удорожанию работ. В связи с этим в подавляющем большинстве случаев бурение скважин на нефть и газ в ММП осуществляется с промывкой БР с положительной температурой.

В настоящее время для получения низкотемпературостойких полимерглинистых растворов при бурении скважин в районах распространения ММП в качестве противоморозных добавок в основном используют электролиты NaCl и CaCl<sub>2</sub>. Однако получение стабильных глинистых растворов с этими добавками чрезвычайно затруднено. Такие растворы нестабильны, легко разделяются на твердую и жидкую фазы. С целью улучшения свойств получаемых растворов в качестве противоморозных добавок для них лучше использовать Na<sub>2</sub>Br<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, Na<sub>2</sub>NO<sub>2</sub> и Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> [12, 13], о чем уже было сказано выше.

В ряде случаев применяют водогипановые растворы. Гипан (гидролизированный полиакрилонитрил) прост в получении, растворим в воде, солеустойчив, выпускается в жидком виде при наибольшем содержании активного вещества 8–12 %. Раствор получают с помощью перемешивания реагента с водой в глиномешалке. Он может быть применен в виде полимерных и полимерсолевых растворов для бурения пород с отрицательными температурами. Но водогипановые растворы подходят только для удаления выбуренных частиц породы.

Учитывая трудность регулирования температуры жидкости в зависимости от ее вязкости и длительности циркуляции нужно выбирать минимальную начальную температуру, при которой гарантировалась бы нерастепляемость пород в стенках скважины. Это условие может быть обеспечено при использовании глинистого раствора с  $t_1 = 2$  °С или соленой водой с  $t_2 = -2,5...3$  °С. Значительную роль в температурном режиме бурящейся скважины

играет количество жидкости, подводимой к забоям. Многочисленные опыты показали, что глубина протаивания уменьшается с ростом льдистости пород при понижении начальной температуры раствора и увеличении глубины скважины. При использовании соленой воды (при концентрации 106 кг/м<sup>3</sup>, NaCl) растепление пород меньше, чем при циркуляции по скважине глинистого раствора. Это можно объяснить тем, что применение промывочных жидкостей с пониженной вязкостью приводит к снижению охлаждения раствора в затрубном кольцевом пространстве ниже, чем вязкой среды. В среднем при рассмотренных условиях растепление льда при промывке скважины соленой водой (106 кг/м<sup>3</sup>, NaCl) не превышало 0,085 м, а при использовании глинистого раствора с указанными выше параметрами – 0,105 м.

В последние годы при бурении скважин все чаще отказываются от технологии применения охлажденных жидкостей как неэкономичной и считают целесообразным бурить ММП с большой частотой вращения и с промывочной жидкостью с повышенной структурной вязкости (0,026–0,032 Па·с) и предельного напряжения сдвига (4,4–6,32 Па) при плотности раствора (1,21–1,25) – 103 кг/м<sup>3</sup>. При переходе с глинистого раствора ( $\eta = 0,03$  Па·с) на промывку соленой водой с содержанием NaCl 106 кг/м<sup>3</sup> при  $t_{1н} = 2$  °С и  $\tau = 2$  ч прослеживаются лучшее охлаждение жидкости в процессе движения восходящего потока от забоя и более интенсивный нагрев при подходе его к дневной поверхности. Циркулирующая по скважине промывочная жидкость взаимодействует как с породой, так и со льдом, так как химические процессы не прекращаются даже при отрицательных температурах. Поэтому для стабилизации мерзлых пород, содержащих лед, не стоит применять жидкости, активные по отношению к ним. Более эффективным являются инертные ко льду и водочувствительным породам охлажденные жидкости на органической основе. Промывочные жидкости на водной основе должны быть с малым содержанием твердой фазы, иметь повышенную вязкость и содержать гидрофобизирующие добавки – поверхностно активные вещества. И хотя токсичность поверхностно активных веществ незначительна, попадание их в водоемы может вредно отразиться на биологической жизни, вызывая замедление процессов самоочищения

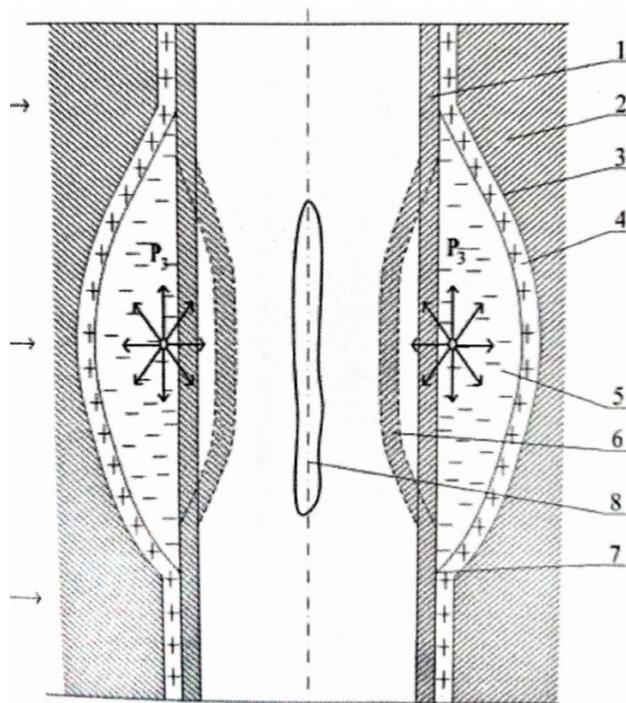


развития водных растительных и животных организмов.

Для предупреждения растепления ММП недостаточно только предварительного охлаждения циркулирующего раствора, необходимо также при проектировании режима бурения выбирать повышенные значения частоты вращения и осевой нагрузки на забой при неизменном количестве подаваемой в скважину жидкости.

**Обратное промерзание прискважинной зоны.** При остановках бурения скважины возникает процесс восстановления естественного температурного режима прискважинной зоны. Этот процесс называют обратным промерзанием. Водные суспензии затрубного и межтрубного пространства при низких температурах значительно быстрее проходят процесс обратного промерзания талых пород и переходят в лед. В результате в стволе скважины при длительных остановках образуются ледяные пробки, а если в скважине находится колонна бурильных труб, то она примерзает к стенкам ствола, то есть происходит прихват. Вместе с тем, следует учесть, что промерзание пород происходит в 3–5 раз медленнее, чем их протаивание. Превращение воды в лед сопровождается увеличением объема на 9 %, что объясняется перестройкой молекулярно-дипольной структуры воды в тригональную кристаллическую решетку льда. При этом силы молекулярного наружного давления для обсадных труб достигают на 1–3 порядка выше предела их прочности. При охлаждении льда, находящегося в замкнутом объеме, на 1 °С давление повышается на 13,43 МПа. Следовательно, чем ниже температура ММП, тем большие усилия действуют на колонну обсадных труб при обратном промерзании пород. Это может привести к смятию и поломке колонн (рис. 1). В связи с этим смятие обсадных колонн – наиболее частая, сложная и практически неизбежная авария в процессе обратного промерзания прискважинной зоны, особенно при наличии замкнутых объемов незацементированных каверн.

При полном развитии процесса смятия разрушению подвергаются все колонны, включенные в состав конструкции скважины, в том числе насокомпрессорные трубы. Это означает, что в процессе длительного простоя возможно разрушение термозащитного оборудования скважины со всеми вытекающими последствиями этой тяжелой аварии.



**Рис. 1. Механизм смятия обсадной колонны в процессе обратного замерзания [10]:**

- 1 – обсадная колонная; 2 – мерзлые породы;
  - 3 – уширение ствола скважины (каверна);
  - 4 – одна из стадий периферийного образования льда;
  - 5 – гидравлическая бомба; 6 – деформация смятия;
  - 7 – ледяная перемычка в суженном пространстве ствола;
  - 8 – трещина в теле обсадной трубы
- Fig. 1. Casing string deformation mechanism under reverse freezing [10]:**
- 1 – casing string; 2 – frozen rocks;
  - 3 – hole enlargement (cavern);
  - 4 – one of the stages of peripheral ice formation;
  - 5 – hydraulic bomb; 6 – bearing deformation;
  - 7 – ice bridge in the restricted space of the borehole;
  - 8 – crack in the casing pipe body

**Режимы бурения скважин в мерзлых породах.** К параметрам режима бурения относят осевую нагрузку на долото ( $PД$ , т), частоту его вращения ( $nД$ , об/мин), количество промывочной жидкости ( $Q$ , л/с). В мерзлых породах степень устойчивости стенок скважины в преобладающей мере зависит от температуры промывочного раствора: скорость таяния льда возрастает с повышением температуры внешней среды. Поэтому для условий бурения в мерзлых породах параметры режима бурения дополняют показателем температуры БР ( $t_{бр}$ ).

Так, осевая нагрузка на долото ( $PД$ , т) поддается гибкому регулированию. При проходке мерзлых пород криолитзоны нагрузку на долота диаметром 215–394 мм целесообразно поддерживать в пределах 80–160 кН.



Для создания частоты вращения бурового долота ( $nD$ , об/мин) целесообразно использовать роторный способ, причем бурение под шахтовое направление следует осуществлять с помощью шнека без промывки. Применение шнека позволяет получить ствол номинального диаметра, обеспечить нормальный спуск шахтового направления, цементирование, сохранив естественное состояние пород. Рекомендовано также вскрытие криолитзоны осуществлять путем бурения скважины малого диаметра, не превышающего 295 мм, а затем расширять ствол скважины до заданного размера.

Количество промывочной жидкости ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) определяется по известной формуле:

$$Q = 0,785 (D_g^2 - d_{от}^2) \cdot V_{ж},$$

где  $V_{ж}$  – скорость восходящего потока БР.

В большинстве случаев удовлетворительная транспортировка частиц шлама из наддольного пространства достигается при сравнительно небольшой скорости восходящего потока в кольцевом пространстве.

Особое внимание следует уделить выбору температурного режима циркуляции промывочной жидкости  $t_{бр}$ , °С. Экспериментально установлено, что скорость таяния льда заметно снижается при температуре жидкой среды ниже 8 °С. Поэтому диапазон температур (5–8 °С) следует считать оптимальным для охлаждения циркулирующего БР.

Кроме того, замечено, что в интервале температур 0–8 °С таяние льда возрастает с ростом минерализации жидкой фазы, а это означает, что БР для этих условий должен быть пресным (без добавок минеральных солей) [3].

*Тампонажные растворы для условий бурения многолетнемерзлых пород.* Температура окружающей среды определяет, в основном, выбор того или иного типа тампонажного материала, а ее химический состав (наличие кислых газов, хорошо растворимых солей и т. п.), перепад температур, пластовое давление – выбор рецептуры тампонажного раствора. При строительстве скважин в зонах распространения ММП применение обычных тампонажных материалов не обеспечивает надежного крепления обсадных колонн и разобщения пластов, так как в этих специфических условиях они характеризуются замедленным твердением, что крайне неблагоприятно отражается на технологических

свойствах цементного камня. Наибольшую скорость гидратации показывает  $\text{CaCl}_2$ , он же самый дешевый.

Правильный подбор тампонажного раствора является ключевым фактором в успешном креплении скважины. Цементирование в ММП связано с существенными осложнениями. Разработано большое количество тампонажных смесей и добавок для борьбы с негативным влиянием отрицательных температур. Но технический прогресс не стоит на месте. В настоящее время разрабатываются добавки для уменьшения теплопроводности и ускорения гидратации цементного камня, предлагается использование наноматериалов для улучшения прочностных характеристик и рассматриваются меры по удешевлению компонентов цементных смесей. Возможными экономическими последствиями от некачественного цементирования являются дополнительные работы по ликвидации перетоков, восстановление целостности колонны или забурка боковых стволов [14].

Одним из наиболее распространенных и простых методов борьбы с ММП являются ускорители схватывания и твердения, которые повышают скорость гидратации и начальную прочность цемента, понижают время схватывания цементного раствора и не дают свободной воде замерзнуть. Среди множества типов ускорителей  $\text{CaCl}_2$  на сегодняшний день является самым дешевым и эффективным [15].

Из-за наиболее активной гидратации цемент с хлоридом кальция имеет наибольшую температуру гидратации, что, с одной стороны, предотвращает замерзание раствора, а с другой – может послужить причиной растрескивания стенок скважины. Одним из существенных минусов  $\text{CaCl}_2$  является коррозионное воздействие на обсадные трубы, что может привести к необходимости раннего капитального ремонта скважины.

Глиноземистый цемент с основой из алюмината кальция имеет высокую скорость гидратации, что позволяет ему быстро схватываться даже в условиях отрицательных температур и иметь высокую раннюю прочность за образования этtringита. Главным минусом глиноземистого цемента является высокая стоимость глиноземсодержащего сырья, что приводит к нерентабельности использования данного материала в чистом виде. Решением данной проблемы может быть использование обогащенного белитом глиноземистого цемента или



тампонажный портландцемент с добавлением глинозема, который довольно экономичен по сравнению с портландцементом.

Классический состав гипсоцемента: гипс, портландцемент и пуццоланы (отходы термического производства, кремнезема). Гипс необходим для быстрого набора ранней прочности в условиях отрицательных температур. Добавление гипса значительно изменяет структуру цементного камня и уменьшает его конечную прочность. Главным минусом данного состава является снижение конечной прочности цементного камня по сравнению с глиноземистым цементом [14, 16].

Аэрация цементных растворов показывает свою эффективность в противодействии катастрофическому поглощению, цементировании обсадной колонны в условиях аномально низкого пластового давления и защите мерзлых пород от оттаивания, так как его теплопроводящая способность в 10 раз ниже, чем у обычного цементного раствора.

Использование стеклянных микросфер позволяет создать цементный камень с низкой теплопроводностью для улучшения крепления скважин как с высокими (более 100 °С), так и с низкими (меньше 0 °С) температурами раствора.

Добавка полиамидных или базальтовых волокон в количестве 1–3 % в цементный раствор способствует увеличению прочности на изгиб и уменьшению усадочных микротрещин с увеличением долговечности структуры гипсоцементно-волоконистого композита. В то же время добавление волокон ухудшает текучесть цементного раствора из-за поглощения волокнами воды. Полипропиленовые волокна и наночастицы кремнезема используют для улучшения прочностных характеристик гипсоглиноземистого цемента. Прочность на сжатие увеличиваются примерно на 22 %.

Основываясь на проведенном анализе научной литературы, можно сделать следующие выводы:

– ускоритель гидратации – дешевый, но недостаточно эффективный материал для крепления в условиях ММП при сравнении с глиноземистым или гипсовым цементом; тампонажный портландцемент с ускорителями схватывания и твердения проигрывает в скорости схватывания цементного раствора и конечной прочности цементного камня;

– глиноземистый цемент обладает быстрой гидратацией и ранним набором проч-

ности даже при отрицательных температурах (до -20 °С), но его дороговизна ограничивает его применение;

– гипсовый цемент, специально разработанный для цементации зон ММП, эффективен и относительно дешев. Для получения наилучших результатов крепления и улучшения эксплуатационных характеристик цементного раствора необходимо использование суперпластификаторов, замедлителей и пеногасителей;

– аэрация и стеклянные микросферы позволяют создать облегченный тампонажный камень с очень низкой теплопроводностью;

– добавки волокон в цементный раствор повышают прочностные характеристики, но понижают прокачиваемость и текучесть цементного раствора.

*Способы защиты конструкций скважин.* Комплекс защитных мероприятий подразделяется на два типа: механические и термические. Термические делятся на активные и пассивные. Рассмотрим только новые технологии защиты, применяемые в последнее время. В российской практике наиболее надежным способом предотвращения оттаивания при бурении и эксплуатации скважин является использование термокейсов (по технологии труба в трубе) [17, 18].

Он представляет собой колонну, изготавливаемую из труб диаметром  $\varnothing$  530 и 820 мм (возможно изготовление других размеров) по технологии: труба в трубе с заливкой пространства между трубами специальным теплоизолирующим материалом – пенополиуретаном. Направление содержит внутреннюю и наружную коаксиальные трубы 1 и 2 и размещенный между ними теплоизолирующий материал 3. Рекомендуется при неглубоких многолетних мерзлых грунтах – до 30 м. Существуют зарубежные и отечественные разработки [19]. Общая длина – 25 м, бурение под термокейс производится долотом  $\varnothing$  555 мм с расширителем 915 мм и утяжеленной буровой трубой. Обсадные колонны и кондуктор должны оснащаться центраторами. Верхняя часть термокейса опускается ниже уровня поверхности земли на 1,2 м (рис. 2).

Главные достоинства применения термокейсов:

– снижение затрат на отсыпку грунтов и уменьшение размера кустовой площадки вследствие сокращения допустимого расстояния между устьями. В частности, в одинаковых

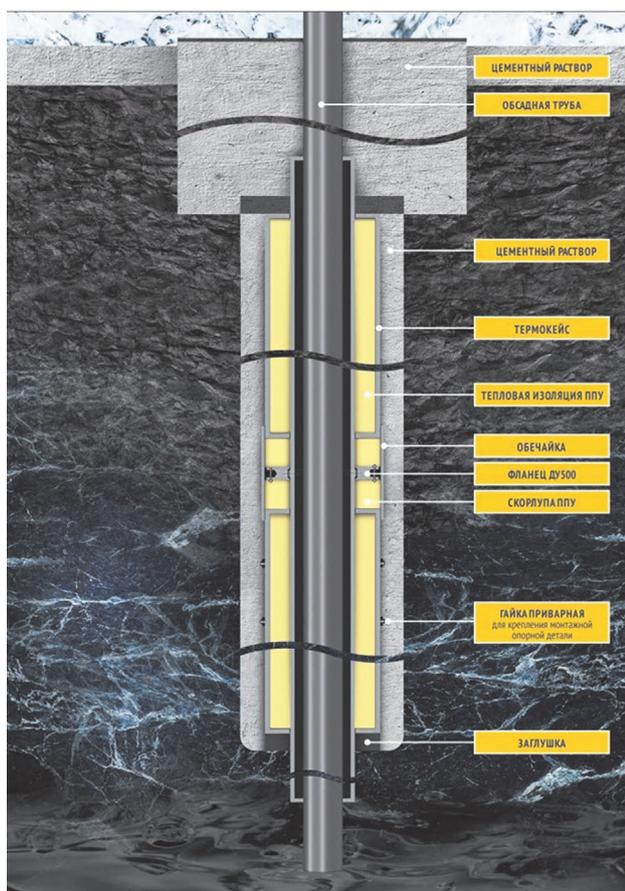


Рис. 2. Обсадная колонна для скважины [19]  
Fig. 2. Well casing string [19]

условиях термокейсы, в сравнении со стандартными нетеплоизолированными направлениями, позволяют снизить допустимое расстояние между устьями с 18 до 10 м. Согласно проектным расчетам, экономия только на отсыпке грунтов приводит к общей экономии на обустройстве кустовой площадки в 10 % (по конкретному проекту 2013 г.);

- предотвращение порчи насосного оборудования вследствие растепления многолетнемерзлых грунтов;

- уменьшение площади негативного воздействия на окружающую среду благодаря уменьшению размера кустовой площадки;

- обеспечение защиты окружающей среды в районе расположения скважин.

Эффективность применения термокейсов подтверждается данными Бованенковского газового месторождения [8]. Была проанализирована математическая модель распространения нестационарных тепловых полей в мерзлых грунтах из двух добывающих скважин месторождения [2, 18, 20, 21]. Установлено, что на радиус оттаивания одной скважины в малой степени

влияют соседние скважины. Так, для двух скважин, расположенных на расстоянии 8 м друг от друга, радиусы протаивания не стыкуются. Глубина теплоизоляции была 55 м, радиус протаивания  $R_{пр} = 7 + 10$  м. Бурение промежуточных и глубоких скважин в районах вечной мерзлоты обычно включает применение теплого БР с определенной динамикой оттаивания пласта вокруг скважины. Применяемый метод [3], основан на изменении фазы оттаивания (задача Стефана). Анализ радиуса протаивания скважин в режиме паротеплового воздействия показывает, что он составляет 7–10 м после 10 лет ее эксплуатации. В производственных условиях радиус оттаивания может контролироваться двумя методами: удельным сопротивлением и сейсмическим каротажем [21, 22].

Механические способы защиты скважин не предполагают ограничения тепловой эрозии прискважинной зоны и направлены на предотвращение деформаций металлической крепи. Способы механической защиты скважин от воздействия многолетней мерзлоты представлены на рис. 3 [23].

Предупреждение продольных изгибов колонн, связанных с потерей их устойчивости в воронках протаивания, осуществляют путем подвески колонн 3 на специальных фермах 4 (рис. 3, а), опоры которых устанавливают около устья скважины за пределами зоны протаивания 2. Гибкие тяги 5 узла подвески позволяют также компенсировать термические удлинения обсадных колонн. Более надежное техническое решение представлено на рис. 3, б. Опоры фермы крепятся к размещенной за пределами воронки протаивания конструкции из металлических выкладок 6. Подвеска обсадных колонн 3 осуществляется с помощью приварных косынок 8 и жестких тяг 5. Компенсация термических удлинений достигается с помощью телескопического узла 7.

В Западной Сибири проблему предотвращения изгибов надземной части скважинной арматуры в воронках протаивания решают при помощи установки гибких растяжек 9 (рис. 3, с). Решить проблему устойчивости грунтового основания нефтяных и газовых скважин, а также сократить расстояние между скважинами с 20 до 10–12 м, позволяет применение вертикальной естественно действующей трубчатой системы. Уникальность этой системы для термостабилизации устьев скважин обусловлена возможностью размещения вертикальных ох-



лаждающих труб в зоне скважины, а надземного конденсаторного блока – на расстоянии 10–20 м от самой скважины, не препятствуя ее обслуживанию [23]<sup>1</sup>.

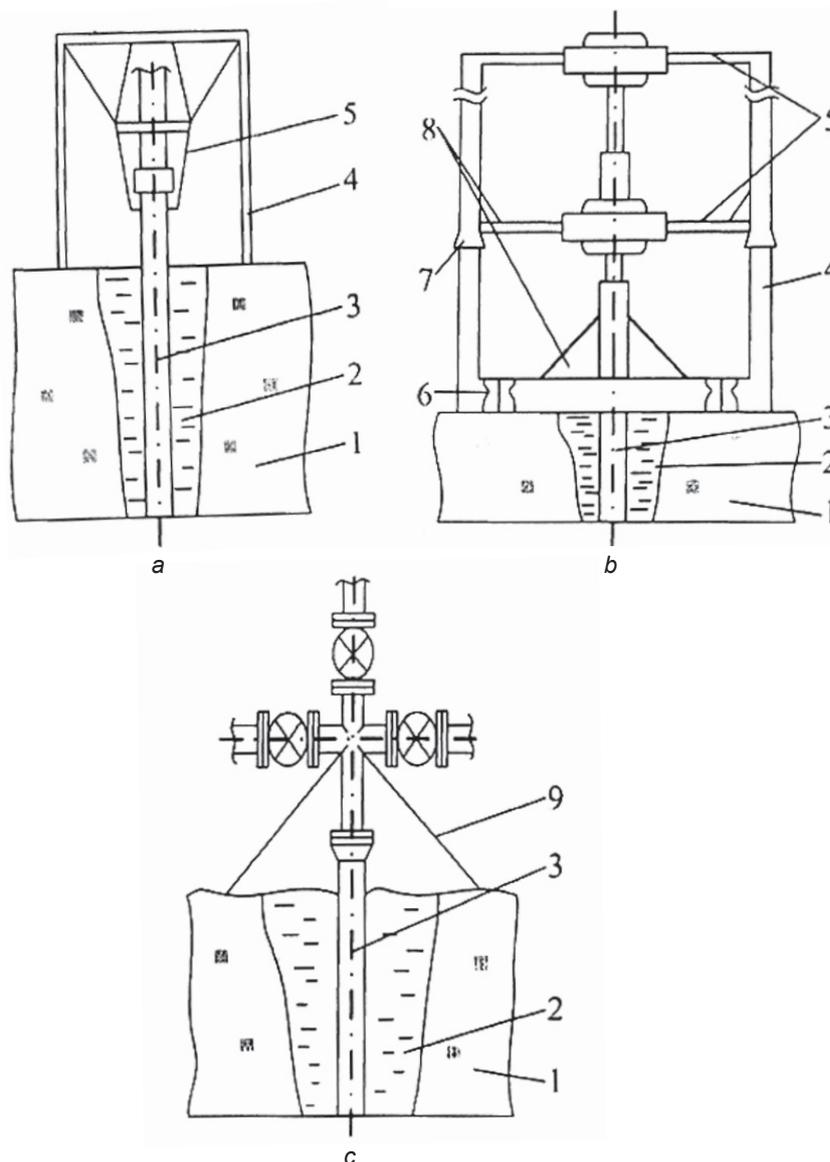
Система состоит из трех основных элементов:

1. Вертикальные охлаждающие трубы, служат для циркуляции хладагента и замораживания грунта.

2. Соединительные трубы, объединяют охлаждающие трубы и конденсаторный блок.

3. Конденсаторный блок, расположенный на поверхности грунта. В конденсаторном блоке за счет естественной конвекции и силы тяжести происходит конденсация паров хладагента и дальнейшая перекачки его по системе.

Вертикальная естественно действующая трубчатая система работает следующим образом. В охлаждающих трубах происходит перенос тепла грунта к хладагенту. Хладагент переходит из жидкой фазы в парообразную. Пар перемещается в сторону конденсаторно-



**Рис. 3. Способы механической защиты скважин от воздействия многолетней мерзлоты [23]:**

1 – мерзлые породы; 2 – воронка протаивания; 3 – обсадная колонна; 4 – ферма; 5 – тяги узла подвески;  
6 – металлические выкладки; 7 – телескопическое звено; 8 – приварные косынки; 9 – растяжки

**Fig. 3. Methods of well mechanical protection from permafrost effects [23]:**

1 – frozen rocks; 2 – thawing funnel; 3 – casing string; 4 – truss; 5 – hanger unit rods;  
6 – metal strings; 7 – telescopic link; 8 – welded gussets; 9 – guy lines

<sup>1</sup> Mauer R. Oil well blowout at Alaska's North Slope remains out of control // The Anchorage Daily News. Режим доступа: <https://www.mcclatchydc.com/news/nation-world/national/article24724426.html> (дата обращения: 09.02.2024).



го блока, где конденсируется в жидкую фазу, отдавая тепло через оребрение в атмосферу. Охлажденный и сконденсированный хладагент вновь стекает в испарительную систему и повторяет цикл движения. Остальные способы не нашли широкого применения.

### Закключение

На основе анализа отечественных и зарубежных работ можно вывести следующие заключения и рекомендации:

1. Применять шнековый способ бурения под шахтовое направление.
2. Перекрывать кондуктором интервал скважины равный зоне ММП плюс дополнительно 50 м.
3. Спускать направление глубиной не менее 20–30 м с обязательной обвязкой желобной системой с целью предотвращения размыва устья скважины при бурении под кондуктор.
4. Герметизировать кольцевое пространство между кондуктором и стенками ствола в газовых и газоконденсатных скважинах с помощью пакера.
5. Обращать внимание, что при длительных остановках в бурении возможно обратное промерзание пород и их выпучивание. Возможно появление газогидратов, деформации труб и даже их слом.
6. Осуществлять продолжительность бурения при температуре БР не выше 5 °С не более трех суток.
7. При температуре ММП до -2 °С эксплуатационные и разведочные скважины глубиной более 3 км необходимо бурить по двухколонной конструкции. Например, 324×219×146.
9. В глинистых породах для предотвращения провалов колонн устанавливать колонные башмаки.
10. Для профилактики размыва направления снижать гидравлические потери в кольцевом пространстве.
11. Расчет на прочность материала эксплуатационной колонны должен учитывать давления при обратном промерзании пород.
12. Предотвращение осложнений в скважинах, вызванных таянием ММП, достигается применением двух способов решения проблемы: надлежащей обвязкой и подвеской обсадных колонн, которые обеспечат сохранность сква-

жины при растеплении мерзлоты и оседании грунта, а также термоизоляцию обсадных колонн с целью недопущения растепления ММП.

13. В условиях ММП лучшими составами крепления скважин являются кальцево-глиноземистые цементы. В качестве ускорителей можно добавлять до 2 %  $\text{CaCl}_2$ , воду затворения необходимо подогревать. Минимальная температура цементного раствора должна быть 16 °С. Рекомендуются арктические марки цемента: Permafrost, белитоалюминатный цемент и облегченный раствор с полыми стеклянными микросферами и суперпластификаторами.

14. Бурение эксплуатационных скважин в ММП возможно с помощью БР с отрицательной температурой (дорогостоящий метод). Применение БР с положительной температурой возможно, однако требует применения специальных защитных технологий.

15. Параметры БР на водной или нефтяной основе применяемого для нерастепления пород должны быть следующими:

- температура в пределах от 0 °С до 2,5 °С;
- повышенная структурная вязкость (0,026–0,032) Па·с;
- плотность (1,21–1,25)  $10^3$  кг/м<sup>3</sup> (при переходе глинистого раствора на промывку соленой водой с  $\text{NaCl}$   $10^2$  кг/м<sup>3</sup> проследивается лучшее охлаждение жидкости в процессе ее движения; при этом допускается температура до -3 °С, а БР должен быть инертен ко льду и содержать добавки поверхностно активных веществ).

Перспективным направлением совершенствования технологии бурения является создание принципиально новых маловязких промывочных жидкостей с малым содержанием твердой фазы, обладающих структурными свойствами глинистых растворов и не замерзающих при отрицательных температурах, а также новых смазочно-охлаждающихся жидкостей и быстросхватывающихся смесей на полимерной основе, новых химических средств крепления, борьбы с обвалами водочувствительных горных пород и поглощениями.

Все это требует целенаправленных и согласованных усилий организаторов производства, исследователей, специалистов и практиков-буровиков.

### Список источников

1. Аветов Н.Р., Якушев В.С. Распространение и особенности заколонных газопроявлений на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении // Газовая промышленность. 2017. № 6. С. 26–30. EDN: YUPZHD.



2. Ваганова Н.А., Махнаева В.В., Филимонов М.Ю. Моделирование последствий воздействий на вечную мерзлоту от технических систем на северных нефтегазовых месторождениях // Математическое моделирование в естественных науках. 2017. Т. 1. С. 53–57. EDN: ZMNINN.
3. Мазыкин С.В., Ноздря В.И., Мнацаканов В.А., Полищученко В.П., Царьков А.Ю., Скотнов С.Н. Комплексное решение проблем бурения скважин Северо-Веситинского месторождения // Бурение и нефть. 2014. № 3. С. 23–24. EDN: RXXCZT.
4. Литвиненко Б.С., Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К. Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород. М.: Недра, 1991. 295 с. EDN: YMБEHV.
5. Are F.E. The problem of deep gas release into the atmosphere // Permafrost response to economic development, environmental security and natural resources / eds R. Paepe, V.P. Melnikov, E. Van Overloop, V.D. Gorokhov. Berlin: Springer, 2001. P. 497–509. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0684-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0684-2_34).
6. Егоров Н.Г. Бурение скважин в сложных геологических условиях: монография. Тула: Гриф и К, 2006. 301 с. EDN: QMYJNF.
7. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost // Nature. 2001. Iss. 410. P. 889–890. <https://doi.org/10.1038/35073746>.
8. Шанаенко В.В. Бурение в вечной мерзлоте – больше не проблема // Нефть. Газ. Новации. 2014. № 11. С. 25–27. EDN: TELLBN.
9. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia // Polarforschung. 2012. Vol. 81. Iss. 2. P. 151–153.
10. Kutasov I.M., Eppelbaum L.V. Time of refreezing of surrounding the wellbore thawed formations // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Vol 122. P. 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.031>.
11. Медведский Р.И. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах. М.: Недра, 1987. 230 с.
12. Перейма А.А., Черкасова В.Е. Биополимерные промывочные жидкости для бурения скважин в мерзлых породах // Газовая промышленность. 2010. № 3. С. 66–69. EDN: LABUCF.
13. Перейма А.А., Кондренко О.С., Минченко Ю.С. Биополимерглинистые буровые растворы для проводки скважин в зоне многолетнемерзлых пород // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. Т. 1. С. 28–31. EDN: NCQHYN.
14. Debruijn G., Popov M., Bellabarba M. Study of cementing practices in the Arctic region // Society of Petroleum Engineers: Arctic Technology conf. (Houston, 3–5 December 2012). Houston, 2012. Vol. 1. P. 306–317. <https://doi.org/10.4043/23744-ms>. EDN: WVNQLJ.
15. Орешкин Д.В., Семенов В.С., Розовская Т.А. Облегченные тампонажные растворы с противоморозными добавками для условий многолетнемерзлых пород // Нефтегазовое хозяйство. 2014. № 4. С. 42–45. EDN: SBKKRD.
16. Korostelev A.S. Design and field practice of application of Arctic cement systems for well construction in permafrost zones. Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition (Moscow, October 2011). Moscow, 2011. Vol. 2. P. 880–894. <https://doi.org/10.2118/149928-MS>.
17. Marques C., Castanier L.M., Kovscek A.R. Super insulated wells to protect permafrost during thermal oil recovery // International Journal of Oil Gas and Coal Technology. 2011. Vol. 4. Iss. 1. P. 4–30. <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2011.037742>.
18. Полозков К.А., Близнюков В.Ю., Полозков А.В., Гафтуняк П.И. Теплоизоляция конструкций добывающих скважин в зонах распространения многолетнемерзлых пород // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2009. № 11. С. 14–17. EDN: MLJGLZ.
19. Samarskii A.A., Vabischevich P.N. Computational heat transfer, volume 2: the finite difference methodology. New York: John Wiley & Sons, 1996. 432 p.
20. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Ekaterinburg, 19 May 2017). Ekaterinburg, 2017. Vol. 72. P. 12005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/72/1/012005>.
21. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields // Applications of Mathematics in Engineering and Economics: 41<sup>st</sup> Intern. conf. (Sozopol, 8–13 June 2015). Sozopol, 2015. Vol. 1690. Iss. 1. P. 20016. <https://doi.org/10.1063/1.4936694>.
22. Гасумов П.А., Толпаев В.А., Кондренко О.С. Расчет изотермического фронта протаивания вечной мерзлоты по данным, полученным при бурении скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 11. С. 37–41. EDN: NQRWPB.
23. Wang Z., Wang X., Sun B., Deng X., Zhao Y., Gao Y., et al. Analysis of wellhead stability during drilling in Arctic permafrost zone // ASME 2017 36<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (Trondheim, 25–30 June 2017). Trondheim, 2017. Vol. 8. P. 25–32. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61868>.

### References

1. Avetov N.R., Yakushev V.S. Distribution and peculiarities of annular gas flows at the Yamburgsk oil and gas condensate field. *Gas Industry Journal*. 2017;6:26-30. (In Russ.). EDN: YUPZHD.
2. Vaganova N.A., Makhnayeva V.V., Filimonov M.Yu. Modeling consequences of engineering system impacts on permafrost in northern oil and gas fields. *Mathematical Modeling in Natural Sciences*. 2017;1:53-57. (In Russ.). EDN: ZMNINN.



3. Mazykin S.V., Nozdrya V.I., Mnatsakanov V.A., Polishchuchenko V.P., Tsar'kov A.Yu., Skotnov S.N. Complex solving of well drilling problems at Northern-Yesitinskoe field. *Drilling and Oil*. 2014;3:23-24. (In Russ.). EDN: RXXCZT.
4. Litvinenko B.S., Kudryashov B.B., Chistyakov V.K. *Drilling wells under conditions of changing aggregate state of rocks*. Moscow: Nedra; 1991, 295 p. (In Russ.). EDN: YMBEHV.
5. Are F.E. The problem of deep gas release into the atmosphere. In: Paepe R., Melnikov V.P., Van Overloop E., Gorokhov V.D. (eds). *Permafrost response to economic development, environmental security and natural resources*. Berlin: Springer; 2001, p. 497-509. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0684-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0684-2_34).
6. Egorov N.G. *Drilling wells in complex geological conditions*. Tula: Grif and K; 2006, 301 p. (In Russ.). EDN: QMYJNF.
7. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*. 2001;410:889-890. <https://doi.org/10.1038/35073746>.
8. Shanaenko V.V. Drilling in permafrost conditions is not a problem anymore. *Oil. Gas. Innovations*. 2014;11:25-27. (In Russ.). EDN: TELLBN.
9. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012;81(2):151-153.
10. Kutasov I.M., Eppelbaum L.V. Time of refreezing of surrounding the wellbore thawed formations. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017;122:133-140. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.031>.
11. Medvedsky R.I. *Construction and operation of oil and gas wells in permafrost rocks*. Moscow: Nedra; 1987. 230 p. (In Russ.).
12. Pereyma A.A., Cherkasova V.E. Biopolymer flushing fluids for well drilling in frozen rocks. *Gas Industry Journal*. 2010;3:66-69. (In Russ.). EDN: LABUCF.
13. Pereima A.A., Kondrenko O.S., Minchenko Ju.S. Biopolymer-clay drilling fluids for drilling wells in permafrost rocks. *Onshore and Offshore Oil and Gas Well Construction*. 2011;1:28-31. (In Russ.). EDN: NCQHYH.
14. Debruijn G., Popov M., Bellabarba M. Study of cementing practices in the Arctic region. In: *Society of Petroleum Engineers: Arctic Technology conf.* 3–5 December 2012, Houston. Houston; 2012, vol. 1, p. 306-317. <https://doi.org/10.4043/23744-ms>. EDN: WVNQLJ.
15. Oreshkin D.V., Semyonov V.S., Rozovskaya T.A. Light-weight backfill mortars with antifreeze additives for the permafrost conditions. *Oil and Gas Industry*. 2014;4:42-45. (In Russ.). EDN: SBKKRD.
16. Korostelev A.S. Design and field practice of application of Arctic cement systems for well construction in permafrost zones. In: *Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition*. October 2011, Moscow. Moscow; 2011, vol. 2, p. 880-894. <https://doi.org/10.2118/149928-MS>.
17. Marques C., Castanier L.M., Kovscek A.R. Super insulated wells to protect permafrost during thermal oil recovery. *International Journal of Oil Gas and Coal Technology*. 2011;4(1):4-30. <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2011.037742>.
18. Polozkov K.A., Bliznukov V.Yu., Polozkov A.V., Gaftouniak P.I. Heat isolation of operational wells in permafrost zone. *Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2009;11:14-17. (In Russ.). EDN: MLJGLZ.
19. Samarskii A.A., Vabischevich P.N. *Computational heat transfer, volume 2: The finite difference methodology*. New York: John Wiley & Sons; 1996, 432 p.
20. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 19 May 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2017, vol. 72, p. 12005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/72/1/012005>.
21. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields. In: *Applications of Mathematics in Engineering and Economics: 41<sup>st</sup> Intern. conf.* 8–13 June 2015, Sozopol. Sozopol; 2015, vol. 1690, iss. 1, p. 20016. <https://doi.org/10.1063/1.4936694>.
22. Gasumov P.A., Tolpaev V.A., Kondrenko O.S. Calculation of isothermal front of permafrost rock thawing on the basis of data got during well construction. *Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2011;11:37-41. (In Russ.). EDN: NQRWPB.
23. Wang Z., Wang X., Sun B., Deng X., Zhao Y., Gao Y., et al. Analysis of wellhead stability during drilling in Arctic permafrost zone. In: *ASME 2017 36<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. 25–30 June 2017, Trondheim. Trondheim; 2017, vol. 8, p. 25-32. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61868>.

#### Информация об авторах / Information about the authors



##### **Зайцев Виталий Иванович,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [zaicshev@istu.edu](mailto:zaicshev@istu.edu)

##### **Vitaly I. Zaitsev,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia  
✉ [zaicshev@istu.edu](mailto:zaicshev@istu.edu)



**Карпиков Александр Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
karpikov@istu.edu  
**Alexander V. Karpikov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
karpikov@istu.edu

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

В.И. Зайцев – написание текста статьи, сбор и обобщение данных литературы, анализ материалов.

А.В. Карпиков – подготовка и редактирование материалов статьи, выполнение исследований, методология работы, разработка концепции статьи.

Vitaly I. Zaitsev wrote the text of the article, reviewed the literature on the research problem, analyzed the materials.

Alexander V. Karpikov prepared and edited the article materials, conducted the research, developed research methodology and article concept.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов 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 14.03.2024; одобрена после рецензирования 05.08.2024; принята к публикации 29.08.2024.

The article was submitted 14.03.2024; approved after reviewing 05.08.2024; accepted for publication 29.08.2024.

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

Краткое сообщение

УДК 553.41:551.2.01(571.51)

EDN: VKUYSI

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-316-328

**Система повышения качества сигнала радиотелеметрии  
для повышения эффективности дистанционного зондирования  
Земли с применением беспилотных летательных аппаратов  
в режиме кинематики реального времени****В.В. Ерофеев<sup>a,✉</sup>, А.Н. Костерев<sup>b</sup>, Е.Д. Валькова<sup>c</sup>, В.В. Матыцин<sup>d</sup>**<sup>a-d</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

**Резюме.** При проведении дистанционного зондирования Земли с помощью беспилотных летательных аппаратов зачастую возникает проблема потери связи между базовой станцией оператора и непосредственно беспилотным летательным аппаратом из-за естественных преград для распространения радиосигнала (рельеф, растительность и так далее) и вследствие большой дальности отлета аппарата. Особенно критична такая потеря связи в случае, если съемки ведутся с использованием технологии кинематики реального времени, которая обеспечивает передачу корректирующих поправок с базовой станции на контролер беспилотного летательного аппарата для обеспечения высокоточной пространственной привязки получаемых данных. Цель данной работы заключалась в создании системы ретрансляции сигнала с возможностью ее установки на беспилотный летательный аппарат легкого класса, способный зависать в воздухе более трех часов, для передачи радиосигнала с базы на беспилотный летательный аппарат через стороннее устройство за естественные преграды рельефа и на дальние расстояния. В ходе исследования проведено сравнение различных способов передачи сигнала через стороннее устройство и выявлена наиболее подходящая конфигурация, отвечающая требованиям качества передачи сигнала и простоты конструкции для выполнения работ в труднодоступных регионах. Для создания ретранслятора применялись радиомодемы RFD различных серий и апробировались различные частоты работы в связи с их доступностью и широкой возможностью настройки. В результате проведения работы была получена ретрансляционная пара радиомодемов, позволяющая перенаправлять радиосигнал от базовой станции на беспилотный летательный аппарат без потери качества и скорости передачи данных для выполнения работ дистанционного зондирования Земли с использованием технологии кинематики реального времени. Второстепенной особенностью ретранслятора является использование его как поисковой системы при аварийной посадке беспилотного летательного аппарата в случаях, когда поисковой маяк недоступен.

**Ключевые слова:** ретранслятор, радиомодем, телеметрия, передача сигнала, беспилотный летательный аппарат, рельеф, ретрансляционная пара

**Для цитирования:** Ерофеев В.В., Костерев А.Н., Валькова Е.Д., Матыцин В.В. Система повышения качества сигнала радиотелеметрии для повышения эффективности беспилотных летательных аппаратов дистанционного зондирования Земли в режиме кинематики реального времени // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 316–328. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-316-328>. EDN: VKUYSI.



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

### Brief report

# Radio telemetry signal quality enhancement system to improve Earth remote sensing using unmanned aerial vehicles efficiency in real-time kinematics mode

Vladimir V. Erofeev<sup>a,✉</sup>, Alexey N. Kosterev<sup>b</sup>, Evgenia D. Valkova<sup>c</sup>, Victor V. Matytsin<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** When conducting remote sensing of the Earth using unmanned aerial vehicles, the problem of connection disruption between the operator's base station and the unmanned aerial vehicle controller often arises due to natural obstacles to radio signal propagation (relief, vegetation, etc.) as well as a large range of the vehicle. The loss of connection is especially critical when surveying is carried out using a real-time kinematics technology, which ensures the transmission of correction amendments from the base station to the unmanned aerial vehicle controller to ensure high-precision spatial referencing of the obtained data. The objective of the work was to create a signal retransmission system with the possibility to install it on a light-class unmanned aerial vehicle capable of hovering in the air for more than three hours, for transmitting a radio signal from the base to the unmanned aerial vehicle via a third-party device beyond natural terrain obstacles and over long distances. Having compared various methods of signal transmission via a third-party device, the authors determined the most suitable configuration that meets the requirements for signal transmission quality and design simplicity for performing work in hard-to-reach regions. To create the repeater, RFD radio modems of various series were used and various operating frequencies were tested due to their availability and wide customization capabilities. The work resulted in obtaining a repeater pair of radio modems that make it possible to redirect the radio signal from the base station to the unmanned aerial vehicle without any loss of data quality and transfer rate for performing remote sensing of the Earth using the real-time kinematics technology. A secondary feature of the repeater is the possibility to use it as a search system in case of unmanned aerial vehicles emergency landing if the search beacon is unavailable.

**Keywords:** repeater, radio modem, telemetry, signal transmission, unmanned aerial vehicle, relief, repeater pair

**For citation:** Erofeev V.V., Kosterev A.N., Valkova E.D., Matytsin V.V. Radio telemetry signal quality enhancement system to improve Earth remote sensing unmanned aerial vehicles efficiency in real-time kinematics mode. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):316-328. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-316-328>. EDN: VKUYSI.

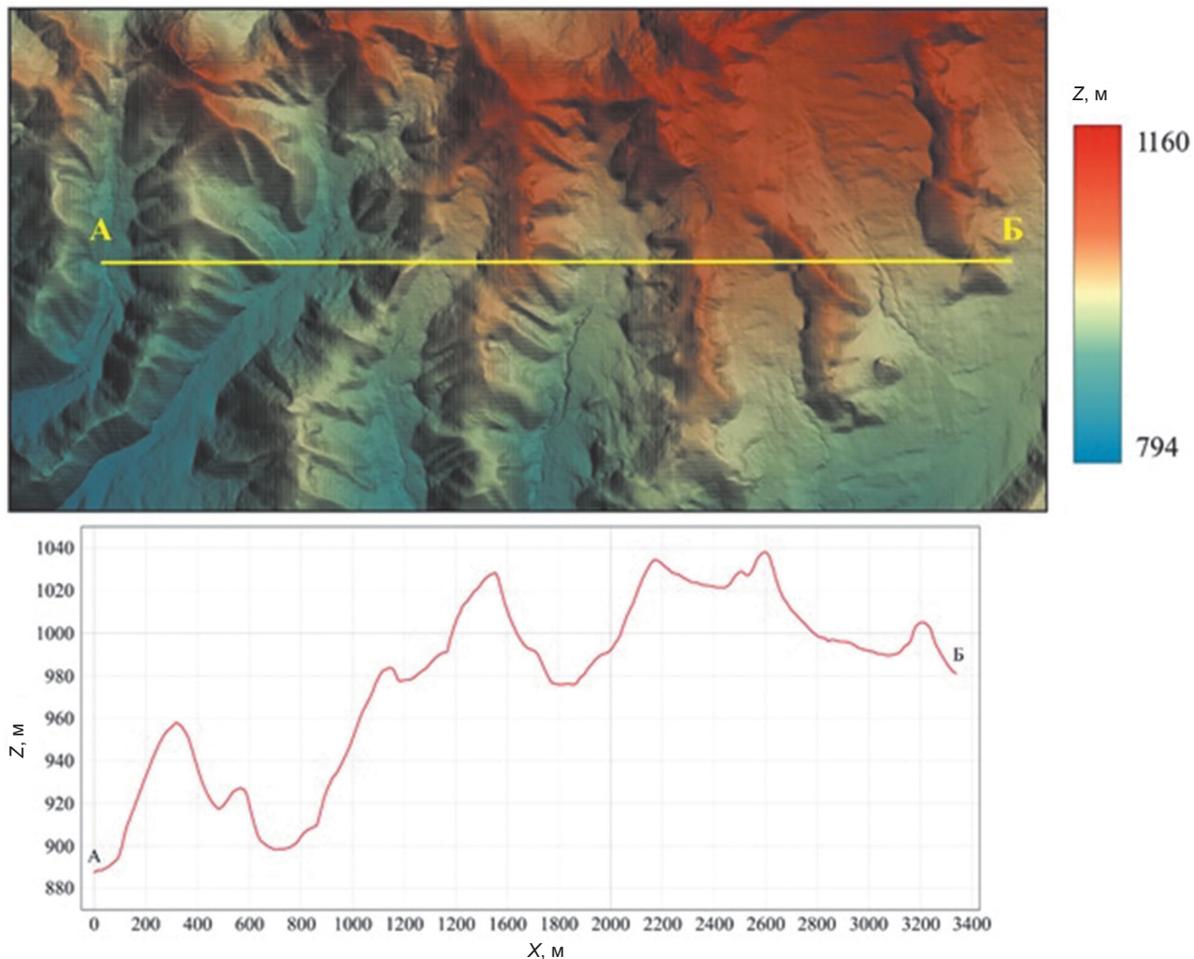
### Введение

Современные исследования в области наук о Земле почти не обходятся без работы с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1, 2]. В последние годы такие съемки получают все большее распространение в российской и мировой практике [3, 4]. При выполнении маловысотных геофизических и геодезических работ важным аспектом является вопрос высокоточной привязки координат данных. В то же время точность прохождения полетных маршрутов зависит от точности определения GNSS-координат (Global Navigation Satellite System – система глобального позиционирования) приемником, установленным на борту беспилотного воздушного судна. Существует методика повышения качества позиционирования БПЛА, однако для этого на протяжении всего полета должна поддерживаться связь между находящимся на базовой точке и радиомодемом, установленным на БПЛА, при помощи системы передачи радиосигнала [5, 6]. При

этом зачастую работы проводятся на участках со сложной морфологией рельефа [7, 8], что служит причиной возникновения проблемы организации связи с БПЛА.

Система ретрансляции сигнала широко применяется в сотовой и радиосвязи с наземным позиционированием ретранслятора [9]. Существуют заводские решения для усиления сигнала, которые позволяют увеличить дальность передачи сигнала радиотелеметрии, но не могут передавать сигнал за естественные преграды рельефа [10]. Как правило, данные усилители сигнала выпускаются под определенные заводские решения, что в рассматриваемых условиях не удовлетворяет нашим требованиям компактности, стоимости и функциональности.

Для выполнения высокоточных геофизических работ и работ дистанционного зондирования земли (аэрофотограмметрия, лидарная съемка и ряд геофизических изысканий [11–13]) применяется система RTK (Real Time Kinematic – кинематика реально-



**Рис. 1. Перепад высот сложного рельефа по линии АБ**  
**Fig. 1. Complex relief elevation changes along the AB line**

го времени) – совокупность приемов и методов получения плановых координат и высот точек местности сантиметровой точности с помощью спутниковой системы навигации посредством получения поправок с базовой станции, принимаемых аппаратурой пользователя [14].

Основным принципом работы RTK является передача поправок на ровер (приемник, который движется по точкам во время съемки). Поправки фиксируются базовой станцией, которая на протяжении всей работы находится в неподвижном состоянии. Для постоянной передачи поправок необходима прямая видимость между ровером (БПЛА) и базой, что в условиях сложного рельефа не представляется возможным (рис. 1). Кроме того, при выполнении работ на площадях 100 км<sup>2</sup> и более удаленность ровера от базы может достигать более 7 км, что негативно сказывается на передаче сигнала, в связи с чем поправки с базовой станции не будут приходить на ровер и, как следствие, ухудшится каче-

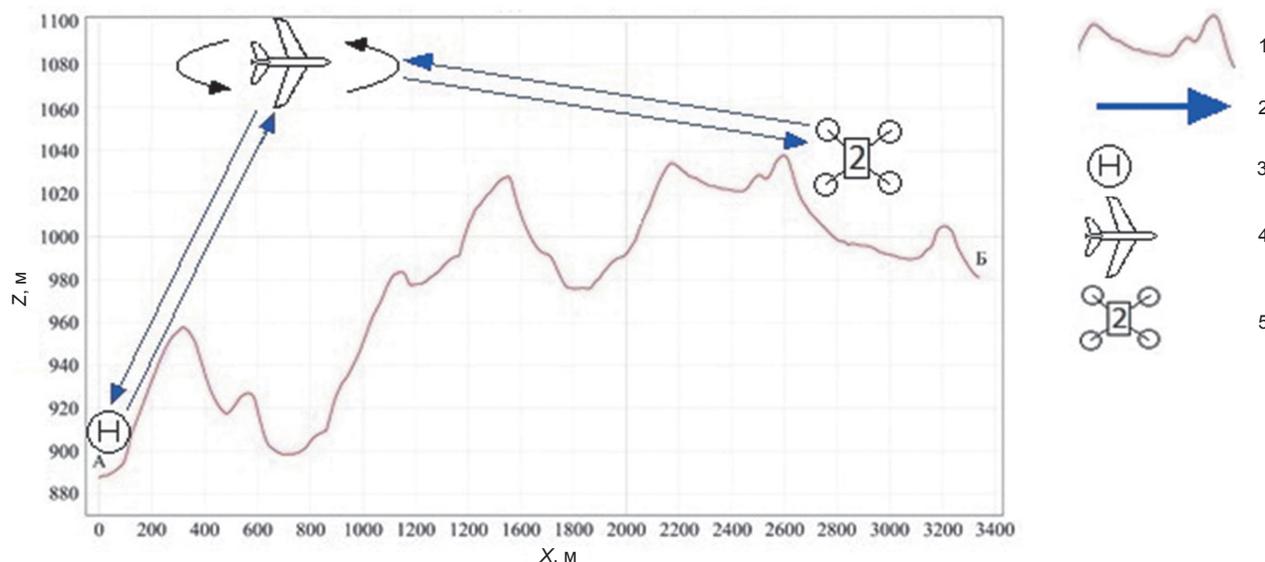
ство позиционирования БПЛА, а вместе с тем и привязка получаемых данных.

### Материалы и методы исследования

Для применения системы ретрансляции сигнала планируется использовать дополнительный БПЛА мультироторного или самолетного типа с размещенной на нем радиотелеметрией, настроенной на режим ретрансляции сигнала. В такой системе база будет являться главным узлом, а ровер и ретранслятор – второстепенными. Важным условием применения данной системы является прямая видимость между передающими узлами, соответственно База – БПЛА 1 – БПЛА 2 (рис. 2).

Рассмотрено два решения реализации применения ретранслятора.

Первое – использовать БПЛА мультироторного типа, который способен зависать над базой (Ground Control Station – GSC) таким образом, чтобы ровер (БПЛА) всегда нахо-



**Рис. 2. Схема передачи сигнала радиотелеметрии при установке ретранслятора на беспилотные летательные аппараты мультироторного или самолетного типа:**

- 1 – маршрут прохождения полетного задания с обтеканием рельефа;
- 2 – направление передачи сигнала радиотелеметрии через ретранслятор;
- 3 – базовая станция;
- 4 – беспилотный летательный аппарат мультироторного или самолетного типа с установленным ретранслятором;
- 5 – беспилотный летательный аппарат, выполняющий полет с обтеканием рельефа

**Fig. 2. Diagram of radio telemetry signal transmission when installing a repeater on a multi-rotor or aircraft-type unmanned aerial vehicle:**

- 1 – route of the flight mission with terrain flowing;
- 2 – direction of radio telemetry signal transmission through the repeater;
- 3 – base station;
- 4 – multi-rotor or aircraft-type unmanned aerial vehicle with an installed repeater;
- 5 – unmanned aerial vehicle performing a flight with terrain flowing

дился в его прямой видимости. Такой способ ретрансляции сигнала предпочтительно применять на участках со сложным рельефом с большими перепадами высот, достигающими 300 м и более, где длина профиля будет до 3–4 км, но из-за морфологических особенностей рельефа сигнал от наземной базы до ровера не будет поступать. При использовании БПЛА мультироторного типа время его полета в режиме зависания составляет 1,5–2 часа. Длительное время полета обусловлено тем, что наибольшие затраты энергии происходят при взлете-посадке, в то время как в режиме зависания происходит наименьший расход заряда батареи [15].

Второй способ заключается в использовании БПЛА самолетного типа [16], который предпочтительно применять на участках со слаборасчлененным рельефом, с перепадами высот не превышающими 150–200 м, где длина профилей полета достигает 7–8 км и сигнал от радиотелеметрии затухает с удалением ровера от базы. В данном случае борт будет курсировать от базы и ровера по циклической траектории таким образом, чтобы база и БПЛА 2 всегда находились в прямой видимости.

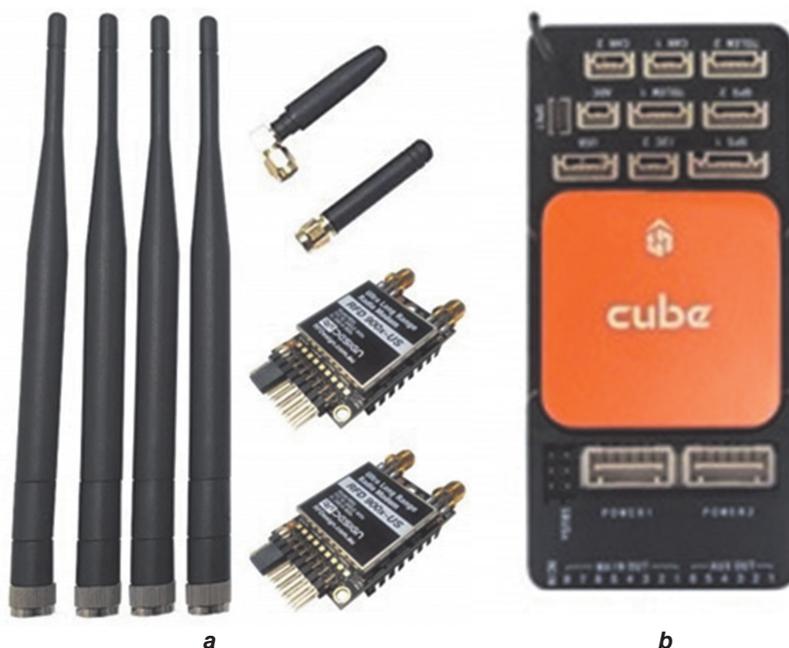
Важным критерием использования БПЛА самолетного типа является возможность его запуска в рабочих условиях, обеспечивающих достаточное место для взлета-посадки аппарата. Время работы составит 3–4 часа.

Выбор БПЛА для размещения на нем ретранслятора определяется исходя из условий выполнения работ и обуславливается в первую очередь рельефом местности и целесообразностью применения конкретного типа БПЛА.

Определенное значение имеет организация передачи сигналов.

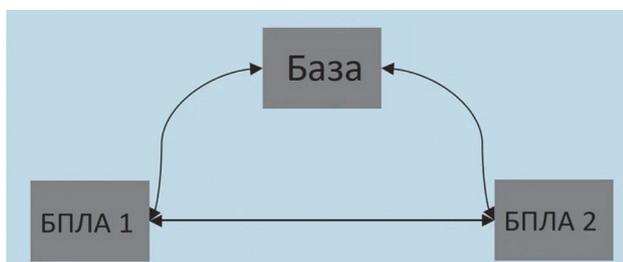
Для ретрансляции сигнала выбраны радиомодемы RFD900x с полетным контроллером PixHawk Cube Orange (рис. 3). Благодаря широким возможностям настройки данный радиомодем, как и полетный контроллер, предпочтителен для создания ретрансляционной системы для задач БПЛА-съемки.

Принцип работы радиомодемов заключается в приеме-передаче сигнала при помощи многоканальной линии радиосвязи, работающей на определенной частоте. Радиомодемы различаются по мощности рабочей частоты и серии модемов, серии различаются форм-фактором и архитектурой.



**Рис. 3. Система передачи сигнала и полетный контроллер:**  
a – радиомодемы RFD900x; b – полетный контроллер PixHawk Cube Orange  
**Fig. 3. Signal transmission system and a flight controller:**  
a – RFD900x radio modems; b – PixHawk Cube Orange flight controller

Данное оборудование позволяет создать многоточечную сеть из нескольких узлов связи. Сеть требует, чтобы одно из устройств взяло на себя роль главного устройства для управления окружающими модемами (рис. 4).



**Рис. 4. Типовая многоточечная сеть**  
**Fig. 4. A typical multipoint network**

Использование многоточечной сети требует специальной настройки радиомодемов, которая осуществляется при помощи программного обеспечения RFD900 Tools (рис. 5)<sup>1</sup>.

В рассматриваемых условиях предлагается задание следующих параметров, показанных на рис. 5.

Приведенная выше система позволяет создать ретрансляционную сеть для передачи сигнала с базы на ровер через ретранслятор как за естественные преграды рельефа, так и

на удаленное расстояние, что позволяет повысить качество привязки координат и соответственно улучшить качество съемки.

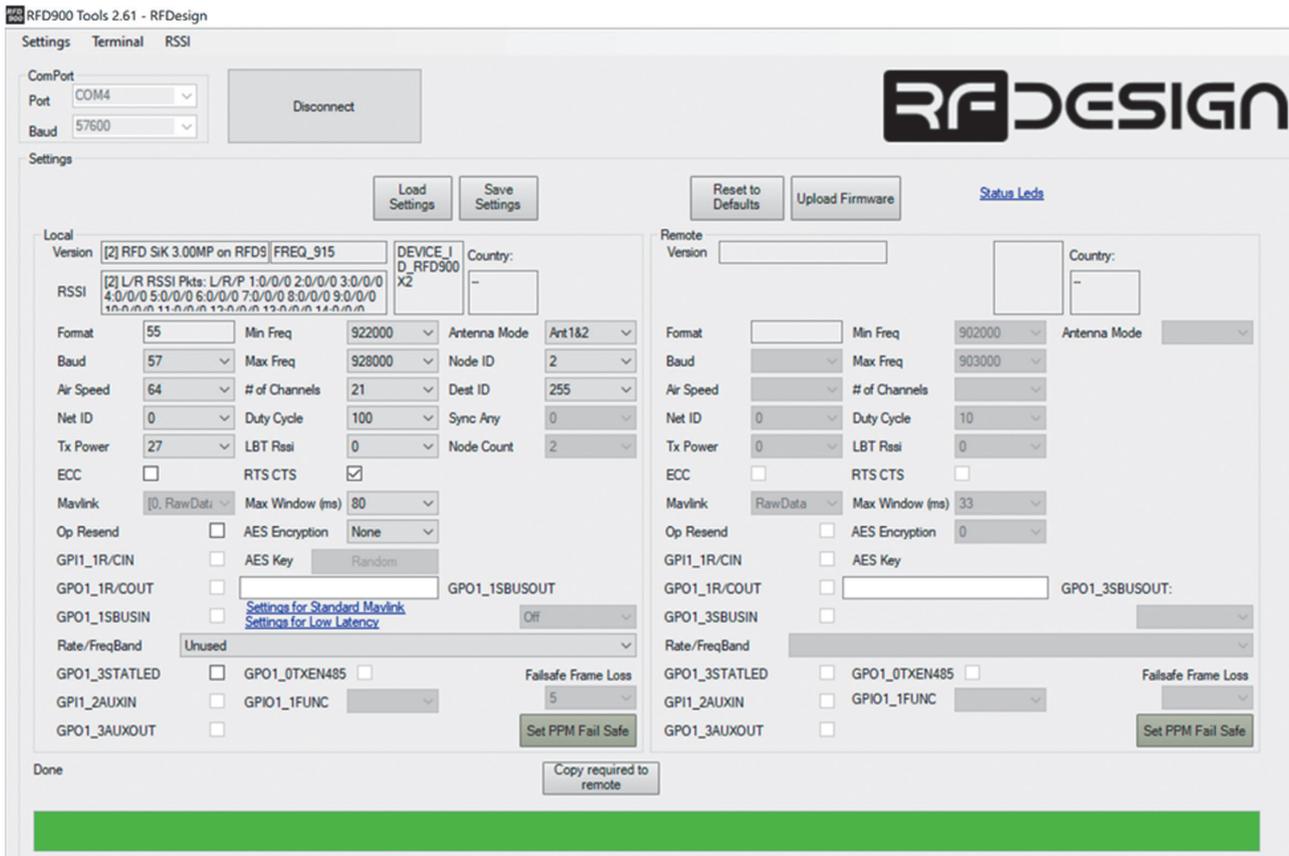
При работе с подобной схемой ретрансляции сигнала периодически возникают ошибки связи с БПЛА, что влечет за собой перебои в передаче поправок от базы на ровер и ухудшение выходных данных. Связано это с аппаратной проблемой работы радиомодемов в многоточечной сети.

Можно предложить второй способ создания ретрансляционной сети – использование дополнительной пары радиотелеметрий, связанных между собой на прием-передачу сигнала.

Для связи двух радиомодемов в ретрансляционной паре необходимо соединить каналы приема и передачи сигнала – PIN (контакт). Для получения сигнала в радиомодеме используется PIN7 – Rx, для отправки сигнала используется PIN9 – Tx (рис. 6).

Связав между собой две радиотелеметрии на прием-передачу сигнала следующим образом, контакт Rx второй телеметрии соединяется с контактом Tx третьей телеметрии. Соответственно, контакт Tx второй телеметрии соединяется с контактом Rx третьей телеметрии (telem2 Rx – telem3 Tx, telem2 Tx – telem3 Rx), настроенной на разные каналы (GSC, радио-

<sup>1</sup> RFD900x Multipoint firmware User Manual // Files.rfdesign.com.au. Режим доступа: <https://files.rfdesign.com.au/Files/documents/RFD900x%20Multipoint%20User%20Manual%20V1.0.pdf> (дата обращения: 14.05.2024).



**Рис. 5. Визуальный вид программы RFD900 Tools:**

*Baud* – скорость передачи данных; *Air Speed* – скорость передачи данных в эфире в одной байтовой форме, кбит/с; *Net ID* – идентификатор сети; *Tx Power* – мощность передачи, дБм; *Min Freq* и *Max Freq* – минимальная и максимальная частота, кГц; *# of Channels* – номер радиоканала; *Duty Cycle* – процент времени, чтобы разрешить передачу; *LBT Rssi* – порог перед передачей; *Max Window (ms)* – максимальный размер транзитного окна, используемый для ограничения максимального времени/задержки; *Antenna Mode* – назначение функции порта антенны; *Node ID* – идентификатор узла; *Dent ID* – идентификатор удаленного узла для связи; *Net Count* – общее количество сетей на одном главном узле; *Ser. brk. x10 ms* – время в миллисекундах для обнаружения обрыва

**Fig. 5. Visual view of the RFD900 Tools program:**

*Baud* – data transfer rate; *Air Speed* – data transfer rate on the air in a single-byte form, kbit/s; *Net ID* – network identifier; *Tx Power* – transmission power, dBm; *Min Freq* and *Max Freq* – minimum and maximum frequency, kHz; *# of Channels* – radio channel number; *Duty Cycle* – percentage of time to allow transmission; *LBT Rssi* – threshold before transmission; *Max Window (ms)* – maximum size of the transit window used to limit the maximum time/delay; *Antenna Mode* – antenna port function assignment; *Node ID* – node ID; *Dent ID* – ID of the remote node for communication; *Net Count* – total number of networks on one master node; *Ser. brk. x10 ms* – disruption detection time in milliseconds

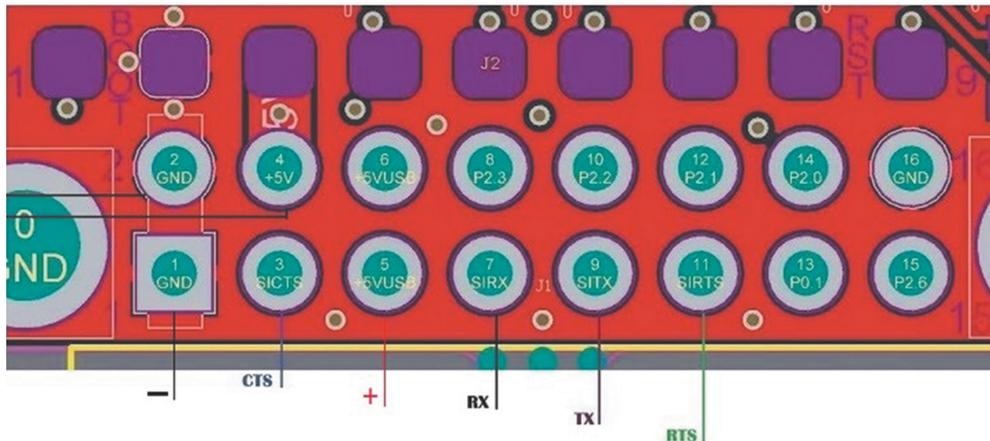
модем ретранслятора 2 – канал 1; радиомодем ретранслятора 3, БПЛА 1 – канал 2), образует ретрансляционную пару. Особенность применения данной схемы ретрансляции сигнала заключается в невозможности прямого подключения GSC к БПЛА 1, сигнал всегда будет перенаправляться через ретранслятор из-за разных идентификаторов сети (рис. 7).

Для применения системы на отдельном БПЛА на удалении от базовой станции необходимо добавлять дополнительный радиомодем для связи GSC с БПЛА 2 – носителем ретранслятора [17], поскольку пара радиоте-

леметрий, образующих ретранслятор сигнала, не подключается к полетному контроллеру БПЛА 2 для управления им, что увеличивает количество применяемого оборудования.

В данной системе применяется прошивка радиомодема RFD SiK Compliant (сеть состоит из двух модемов). Настройка радиомодема осуществляется при помощи программного обеспечения RFD900 Tools (рис. 8).

При этом ретранслятор может быть помещен на носитель БПЛА либо находиться на земле для прямой связи рабочего БПЛА с базовой станцией.

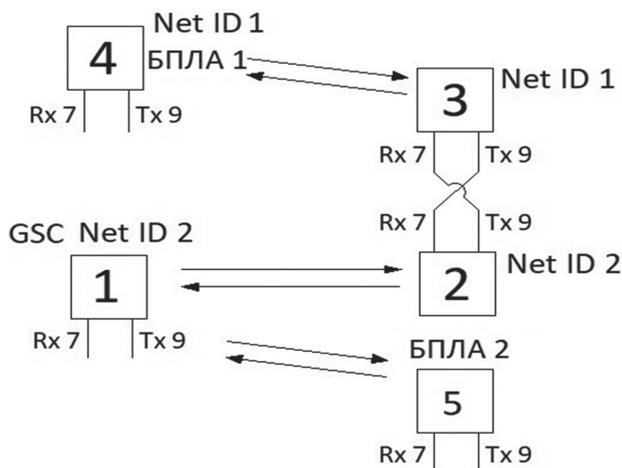


**Рис. 6. PIN схема радиомодема RFD900x:**

1 – заземление (ground); 2 – питание (5 V); 3 – освобождает канал для отправки данных;  
4 – прием сигнала; 5 – отправка сигнала; 6 – выполняет запрос на отpravку сигнала

**Fig. 6. PIN diagram of the RFD900x radio modem:**

1 – ground; 2 – power supply (5 V); 3 – releases the channel to send data;  
4 – receiving a signal; 5 – sending a signal; 6 – executes a request for sending a signal



**Рис. 7. Схема передачи сигнала через ретрансляционную сеть:**

1 – радиомодем GSC (базовой станции);  
2 – первый радиомодем ретранслятора;  
3 – второй радиомодем ретранслятора;  
4 – радиомодем, установленный на беспилотном летательном аппарате;  
Net ID – идентификатор сети;  
БПЛА 1 – беспилотный летательный аппарат, выполняющий полет по рабочему маршруту;  
БПЛА 2 – беспилотный летательный аппарат – носитель ретранслятора; 5 – радиомодем, установленный на беспилотном летательном аппарате носитель

**Fig. 7. Signal transmission scheme via a relay network:**

1 – GSC radio modem (base station);  
2 – the first repeater radio modem;  
3 – the second repeater radio modem; 4 – radio modem installed on the unmanned aerial vehicle;  
Net ID – network identifier; UAV 1 – unmanned aerial vehicle flying along the working route;  
UAV 2 – unmanned aerial vehicle repeater carrier;  
5 – radio modem installed on the unmanned aerial vehicle carrier

Так как работы проводятся на труднодоступных участках с обтеканием рельефа на высоте полета 40–45 м [18], бывают случаи аварийной посадки БПЛА, выполняющего рабочий полет (в связи с неточностью карты высот рельефа). В таких ситуациях, когда сигнал с аварийного маяка не поступает на базу, данная система может использоваться как поисковая, передавая данные о местоположении непосредственно с полетного контроллера.

Питание ретранслятора осуществляется от источника питания копитера, но также возможна установка внешнего питания с подключением отдельной батареи.

### Результаты исследования и их обсуждение

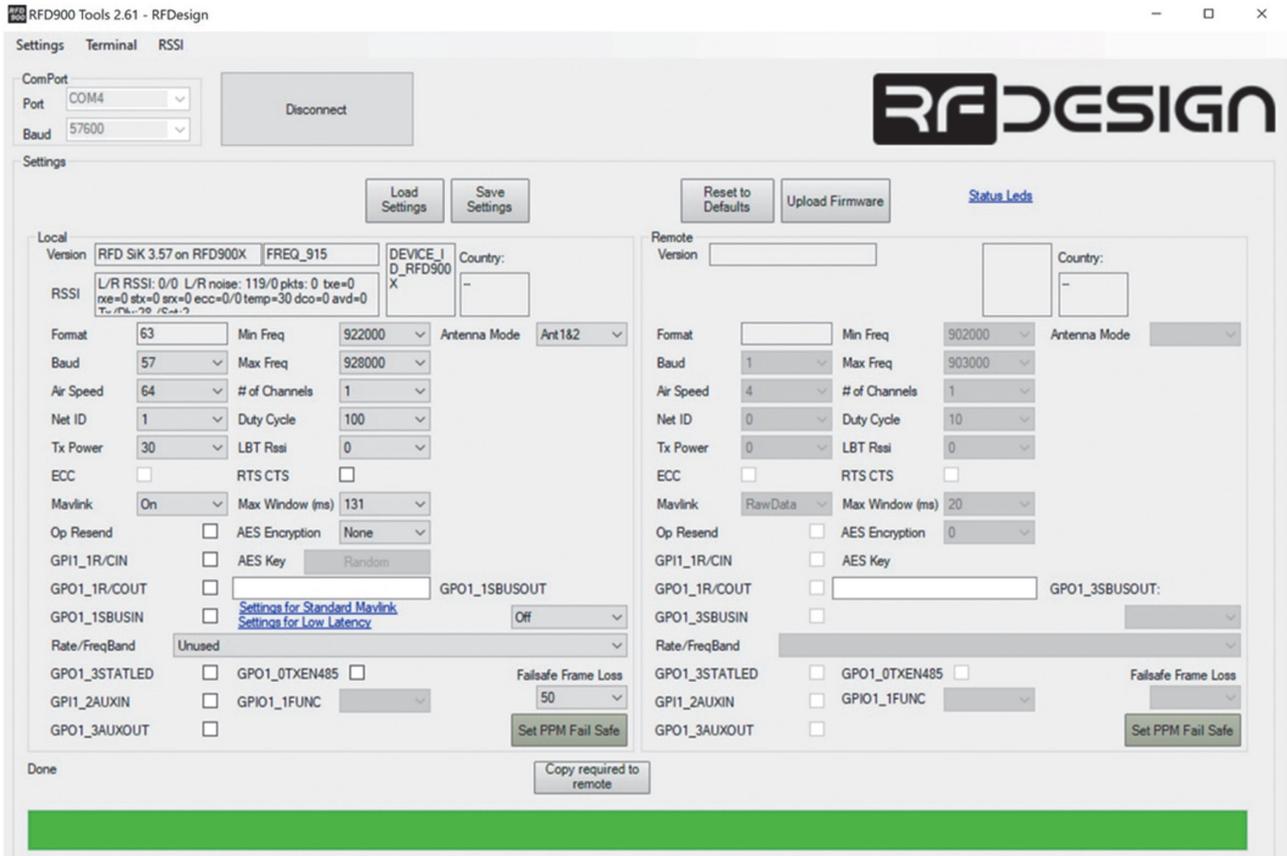
Для проверки качества передачи сигнала используется параметр RSSI – это значение мощности сигнала, поступающего на антенны устройства [19, 20]. Показатель RSSI означает мощность сигнала, принятого прибором<sup>2</sup>.

При работе пары радиомодемов (GSC – БПЛА 1) график RSSI выглядит следующим образом (рис. 9).

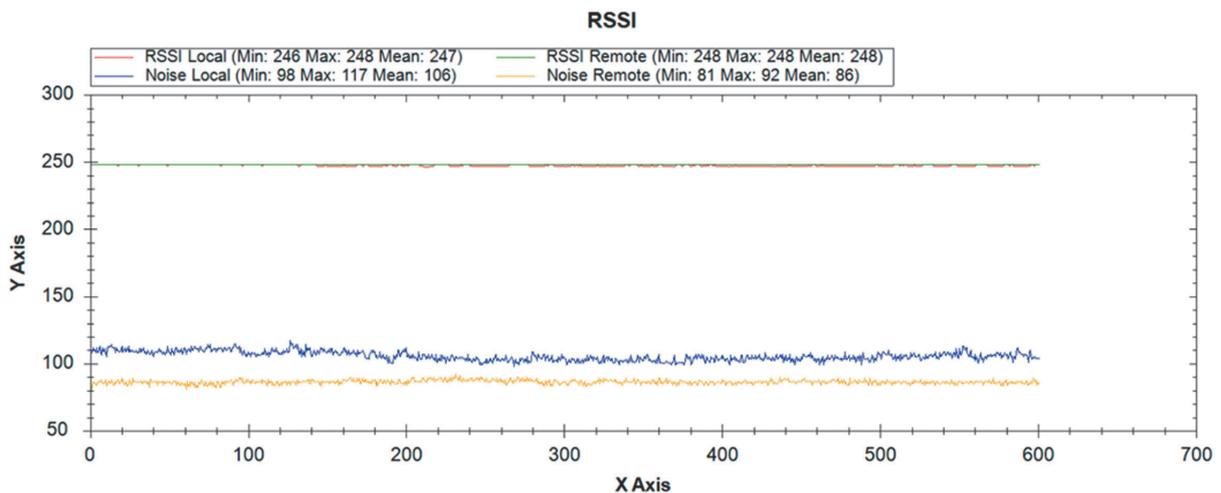
Для определения пары, наиболее подходящей для работы в ретрансляционной сети, проводилось сравнение радиомодемов различных частот и серий.

При работе пары телеметрий ретранслятора на одинаковой частоте они создают помехи друг на друга [21] (рис. 10).

<sup>2</sup> Received Signal Strength Indication (RSSI) // Ardupilot.org. Режим доступа: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-rssi-received-signal-strength-indication.html> (дата обращения: 25.05.2024).



**Рис. 8. Параметры настройки RFD-модема прошивки SiK**  
**Fig. 8. SiK firmware RFD modem settings**

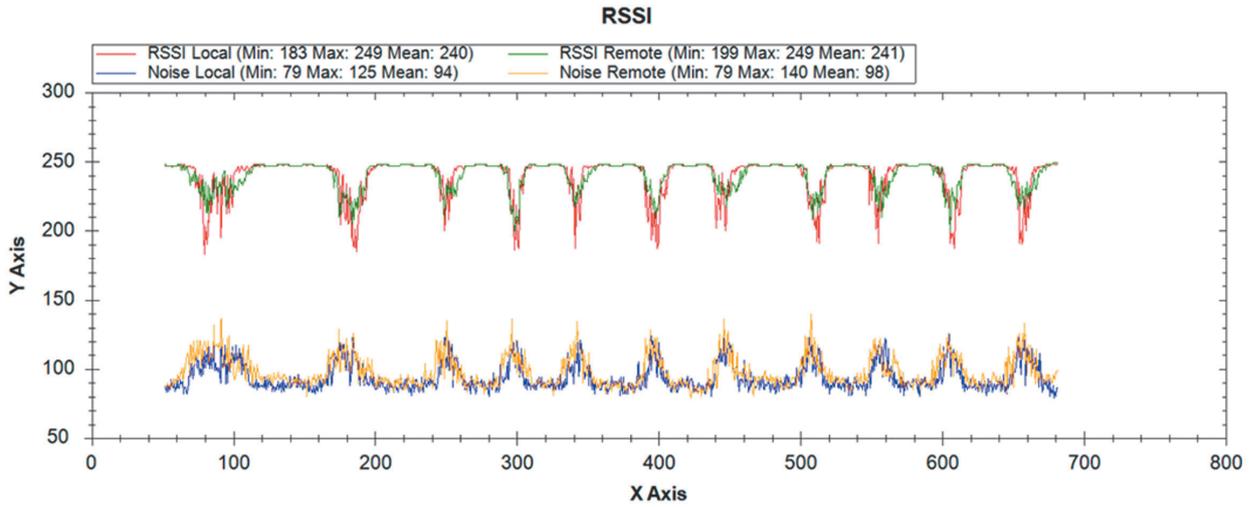


**Рис. 9. График RSSI при использовании пары телеметрий:**  
 Y Axis – мощность сигнала, принятого устройством; X Axis – время работы, с;  
 RSSI Local – локальный RSSI; RSSI Remote – дистанционные радиопомехи RSSI;  
 Noise Local – локальные радиопомехи; Noise Remote – дистанционные радиопомехи

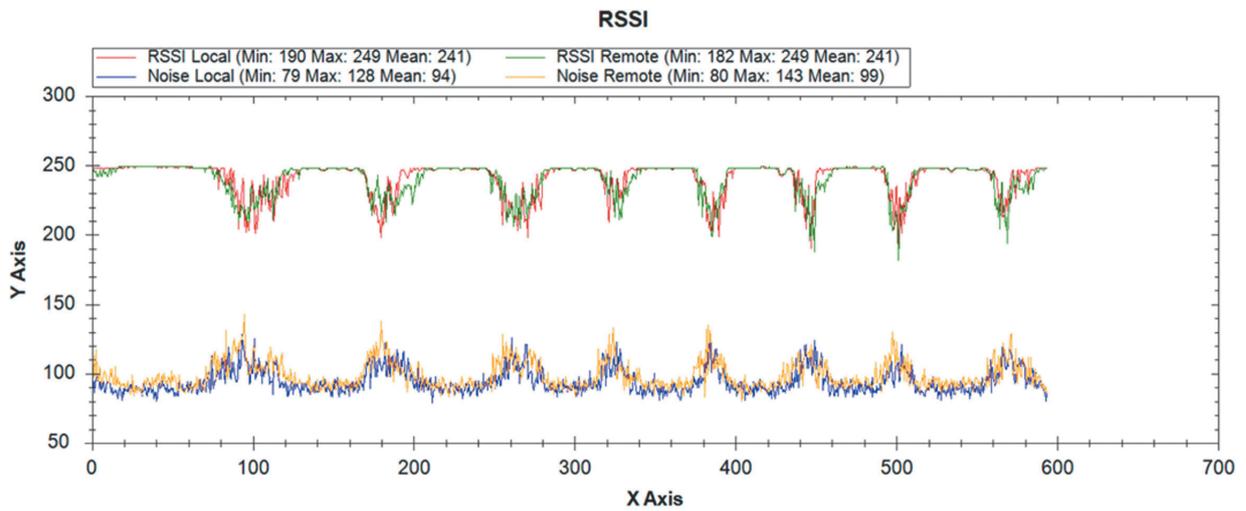
**Fig. 9. RSSI graph when using a pair of telemetry:**  
 Y Axis – strength of the signal received by the device; X Axis – operation time, s;  
 RSSI Local – local RSSI; RSSI Remote – remote radio interference RSSI;  
 Noise Local – local radio interference; Noise Remote – remote radio interference

Для устранения шумов было опробовано использование направленных антенн и применение экранирования телеметрий ретранслятора в паре друг от друга (рис. 11). Для экраниро-

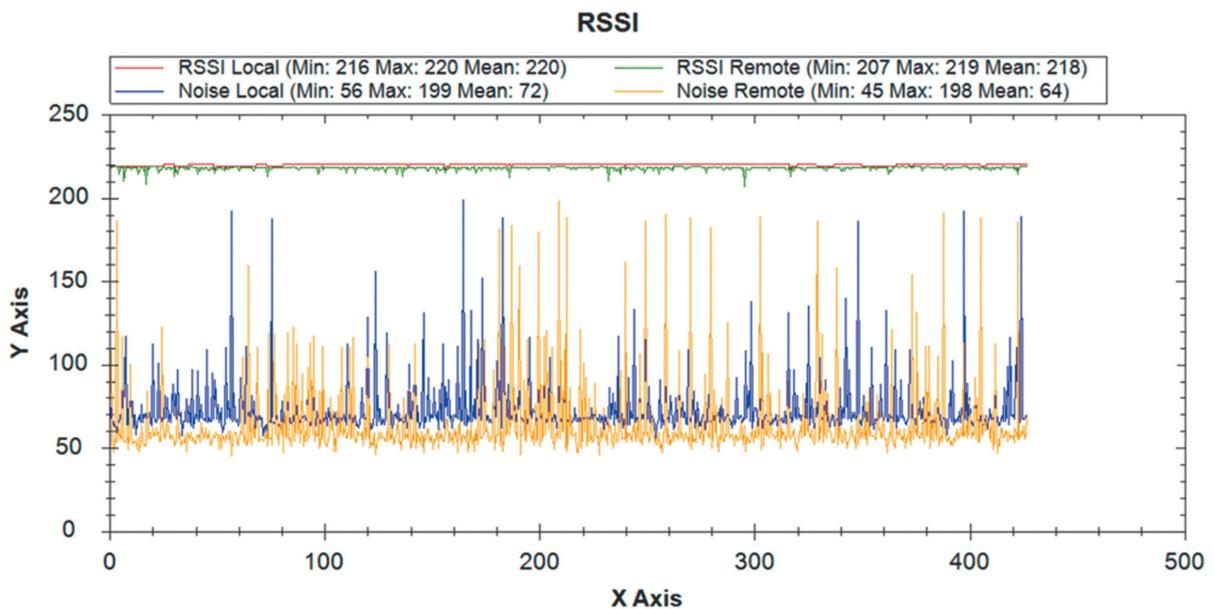
вания помех, которые создаются при близком нахождении двух телеметрий применялись экраны, покрытые алюминиевой самоклеящейся фольгой для экранирования в 100 дБ.



**Рис. 10. График RSSI через разнонаправленные антенны без экранирования радиомодемов**  
**Fig. 10. RSSI graph via multidirectional antennas without radio modem shielding**



**Рис. 11. График RSSI при использовании направленных антенн с экранированием радиомодемов**  
**Fig. 11. RSSI graph when using directional antennas with radio modem shielding**



**Рис. 12. График RSSI при использовании радиотелеметрий серии X и A**  
**Fig. 12. RSSI graph when using X and A series radio telemetry**

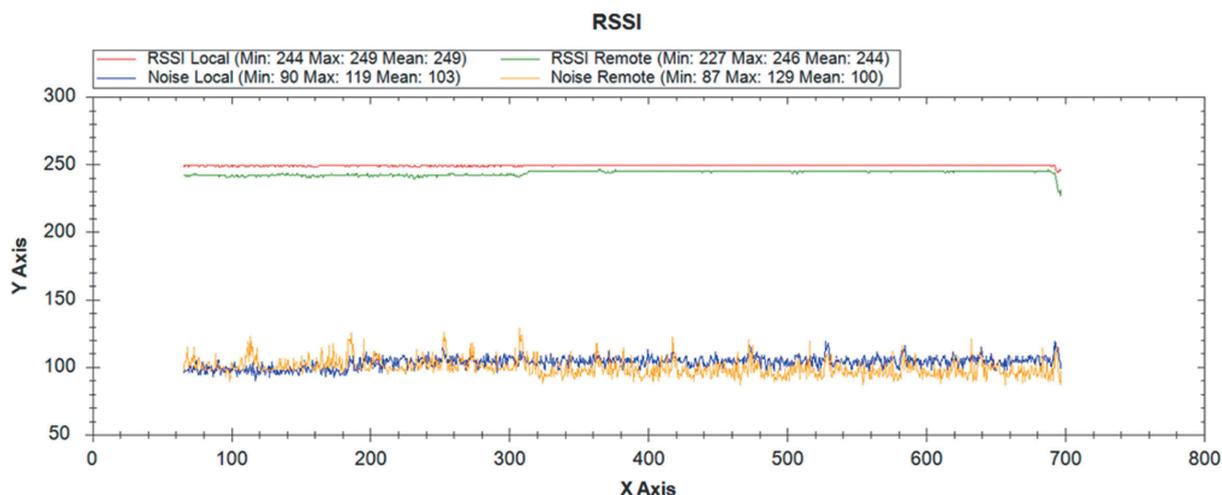


Рис. 13. График RSSI при использовании радиотелеметрий разной частоты одной серии  
Fig. 13. RSSI graph when using same series radio telemetry of different frequencies

Исходя из графика, видно, что шумы и их частота сохраняются и при экранировании, следовательно использование радиомодемов одной частоты не удовлетворяет нашим задачам.

Во втором случае использовали радиотелеметрии разных серий. Из-за отличающейся архитектуры самих модемов при подключении возникают очень сильные шумы, которые мешают передаче сигнала (рис. 12).

В третьем опыте использованы радиотелеметрии с разными частотами одной серии. В этом варианте радиомодемы в паре не создают помехи друг для друга, что повышает качество передаваемого сигнала (рис. 13).

Исходя из представленных данных применение радиотелеметрий разных частот предпочтительней в связи с минимальным количе-

ством наведенных шумов и качеством передачи сигнала.

### Заключение

Результаты практических испытаний показывают, что использование ретрансляторной пары повышает качество и устойчивость связи между БПЛА и GSC с установленной на ней базой RTK и устраняет проблему потери связи с телеметрией БПЛА в условиях сложного рельефа. Это позволяет передавать поправки координат положения коптера на всем протяжении полета, что дает возможность проводить БПЛА-съемку с использованием системы кинематики реального времени с высокой точностью, недостижимой при использовании стандартной передачи данных напрямую от базовой станции к БПЛА.

### Список источников

1. Gantimurova S.A., Parshin A.V., Erofeev V.V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia using UAV data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 18. P. 3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.
2. Гантимурова С.А., Паршин А.В., Костерев А.Н., Субботина Д.А., Кошкин И.О., Лобузов И.В. [и др.]. Исследование опасных скально-обвальных участков кругобайкальской железной дороги по данным беспилотных съемок // Новые идеи в науках о Земле: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 06–07 апреля 2023 г.). М., 2023. С. 213–216. EDN: BQAGMG.
3. Бояркин Г.А. О выполнении топографо-геодезических работ современными методами // Научное обозрение. 2016. № 1. С. 1–9. EDN: UYVOYR.
4. Паршин А.В. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при выполнении геологоразведочных работ на рудных объектах байкальской горной области // Вопросы естествознания. 2015. № 2. С. 97–101. EDN: UZEJXX.
5. Польшинкин А.В., Ле Х.Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 98–107. EDN: RNKKQD.
6. Войтенко К.И., Зеленский В.П. Применение системного подхода при разработке устройства ретрансляции сигналов ГЛОНАСС, GPS // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 10–11 июня 2019 г.). СПб.: 2019. № 1. С. 385–391. EDN: HDSJYQ.
7. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалёв А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования



и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 1 // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 144–149. [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(144-149\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(144-149)). EDN: XQRZBH.

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

9. Терехин С.Н., Синещук Ю.И. Анализ систем спутниковой радионавигации, базирующихся на различных методах ретрансляции // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2011. № 4. С. 42–47. EDN: PFFRIJ.

10. Митрохин В.Е., Зиновьев Н.В. Использование пассивных ретрансляторов для улучшения качества радиосвязи в сложной электромагнитной обстановке // Известия Транссиба. 2021. № 1. С. 142–148. EDN: IAZSNV.

11. Ержанкызы А., Шульц Р., Левин Е., Орынбасарова Э.О. Использование данных аэрофотосъемки для наземного лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 10. С. 69–74. EDN: YQHESD.

12. Широкова Т.А., Антипов А.В., Арбузов С.А. Определение изменений на местности с применением данных лидарной съемки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1. № 4. С. 39–46. EDN: PCYYNL.

13. Whitehead K., Hugenholtz C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2014. Vol. 2. Iss. 3. P. 69–85. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.

14. Варфоломеев А.Ф., Чудайкина О.Ю. Использование RTK-режима систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС при проведении топографических работ // Огарёв-online. 2015. № 4. С. 1–8. EDN: TNDBYJ.

15. Мисиров С.А., Беспалова Л.А., Магаева А.А., Беспалова Е.В. Исследование овражно-балочной сети южного берега Таганрогского залива с использованием беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2019. № 4. С. 77–83. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-77-83>. EDN: BWCPDF.

16. Шаталов Н.В. Особенности классификации БПЛА самолетного типа // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 29. С. 34–49. EDN: VVUFEX.

17. Кузнецов Д.А., Митрошина П.О., Сагдеев А.К., Сёмин А.А. Особенности построения радиоканала с беспилотным летательным аппаратом // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 2. С. 82–88. EDN: OFRIYL.

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

19. Кокорева Е.В., Костюкович А.Е. Результаты натурных испытаний системы определения местоположения в сети Wi-Fi // Экономика и качество систем связи. 2021. № 3. С. 64–71. EDN: EWYYZC.

20. Lavrukhin V.A., Lezhepekov A.S., Vladyko A.G. Experimental testbed for access point selection in IoT Wi-Fi networks // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 102–112. <https://doi.org/10.31854/1813-324x-2017-3-2-102-112>. EDN: YTXOSV.

21. Панов И. Помехи в радиоэфире и как с ними бороться // Т-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2009. № 5. С. 22–28. EDN: KXXKBR.

## References

1. Gantimurova S.A., Parshin A.V., Erofeev V.V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia using UAV data. *Remote Sensing*. 2021;13(18):3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.

2. Gantimurova S.A., Parshin A.V., Kosterev A.N., Subbotina D.A., Koshkin I.O., Lobuzov I.V., et al. Studying dangerous rock-landslide sections of the Circum-Baikal Railway based on unmanned survey data. In: *Novye idei v nauках o Zemle: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = New ideas in Earth sciences: Proceedings of the 16<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. 06–07 April 2023, Moscow. Moscow; 2023, p. 213-216. (In Russ). EDN: BQAGMG.

3. Boyarkin G.A. The execution of topographic and geodetic activities by modern methods. *Nauchnoe Obozrenie*. 2016;1:1-9. (In Russ). EDN: UYVOYR.

4. Parshin A.V. Prospects of using drones for geological exploration of ore deposits at Baikal mountainous area. *Voprosy Estestvoznaniya*. 2015;2:97-101. (In Russ). EDN: UZEJXX.

5. Polynkin A.V., Le H.T. Analysis of characteristics of UAV communication link. *Proceedings of the TSU*. 2013; 7-2:98-107. (In Russ). EDN: RNKKQD.

6. Voitenko K.I., Zelensky V.P. Using a systematic approach in the development of a GLONASS, GPS signal relay device. In: *Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii: sb. nauch. tr. XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = System analysis in design and control: collected scientific papers of the 23<sup>rd</sup> International scientific and practical conference*. 10–11 June 2019, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2019, iss. 1, p. 385-391. (In Russ). EDN: HDSJYQ.

7. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural-geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 1. *Geography and Natural Resources*. 2016;6:144-149. (In Russ). [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(144-149\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(144-149)). EDN: XQRZBH.

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



in composite topography. Part 2. *Geography and Natural Resources*. 2016;6:150-155. (In Russ). [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

9. Terehin S.N., Sineshyk Yu.I. Analysis of systems of satellite radionavigation, being based on different methods of retransmitting. *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2011;4:42-47. (In Russ). EDN: PFFRIJ.

10. Mitrokhin V.E., Zinoviev N.V. The use of passive repeaters to improve radio communications in complex electromagnetic environment. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2021;1:142-148. (In Russ). EDN: IAZSNV.

11. Yerzhankyzy A., Shults R., Levin E., Orynbassarova E.O. Using aerial survey data set for terrestrial laser scanning referencing. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018;10:69-74. (In Russ). EDN: YQHESD.

12. Shirokova T.A., Antipov A.V., Arbuzov S.A. Area change detection using laser scanning data. *Interexpo Geo-Siberia*. 2012;1(4):39-46. (In Russ). EDN: PCYYNL.

13. Whitehead K., Hugenholtz C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2014;2(3):69-85. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.

14. Varfolomeev A.F., Chudaikina O.Yu. RTK mode of global positioning systems of GPS and GLONASS for topographical works. *Ogarev-online*. 2015;4:1-8. (In Russ). EDN: TNDBYJ.

15. Misirov S.A., Bespalova L.A., Magaeva A.A., Bespalova E.V. Investigation of the ravine-beam network of the southern coast of the Taganrog Bay using unmanned aerial vehicles. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2019;4:77-83. (In Russ). <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-77-83>. EDN: BWCPDF.

16. Shatalov N.V. Classification features of aircraft-type UAVs. *Perspektivy Razvitiya Informatsionnykh Tekhnologii*. 2016;29:34-49. (In Russ). EDN: VVUFEX.

17. Kuznetsov D.A., Mitroshina P.O., Sagdeev A.K., Semin A.A. Constructions feature of radio channel with unmanned aerial vehicle. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2016;2(2):82-88. (In Russ). EDN: OFRIYL.

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

19. Kokoreva E.V., Kostyukovich A.E. Results of positioning system field tests in the Wi-Fi network. *Economics and Quality of Communication Systems*. 2021;3:64-71. (In Russ). EDN: EWYYZC.

20. Lavrukhin V.A., Lezhepekov A.S., Vladko A.G. Experimental testbed for access point selection in IoT Wi-Fi networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017;3(2):102-112. <https://doi.org/10.31854/1813-324x-2017-3-2-102-112>. EDN: YTXOSV.

21. Panov I. Radio interference and how to deal with it. *T-Comm*. 2009;5:22-28. (In Russ). EDN: KXXKBR.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Ерофеев Владимир Владимирович**,  
инженер-исследователь департамента геоинформатики,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [verofeev@geo.istu.edu](mailto:verofeev@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0008-7044-4033>

**Vladimir V. Erofeev**,  
Research Engineer of the Geoinformatics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [verofeev@geo.istu.edu](mailto:verofeev@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0008-7044-4033>



**Костерев Алексей Николаевич**,  
ведущий инженер департамента геоинформатики,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
[akosterev@geo.istu.edu](mailto:akosterev@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0001-9262-5697>

**Aleksey N. Kosterev**,  
Leading Engineer of the Geoinformatics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
[akosterev@geo.istu.edu](mailto:akosterev@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0001-9262-5697>



**Валькова Евгения Денисовна,**  
младший научный сотрудник департамента геоинформатики,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
evalkova@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>

**Evgenia D. Valkova,**  
Junior Researcher of the Geoinformatics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
evalkova@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>



**Матыцин Виктор Владимирович,**  
ведущий инженер департамента геоинформатики,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
matyv@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0008-8330-5788>

**Viktor V. Matytsin,**  
Leading Engineer of the Geoinformatics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
matyv@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0009-0008-8330-5788>

#### Вклад авторов / Contribution of the authors

В.В. Ерофеев – написание текста статьи, выполнение исследований, методология работы, разработка концепции статьи.

А.Н. Костерев – подготовка и редактирование материалов статьи, анализ материалов.

Е.Д. Валькова – сбор и обобщение данных литературы, анализ материалов.

В.В. Матыцин – подготовка и редактирование материалов текста.

Vladimir V. Erofeev wrote the article, conducted the research, developed the research methodology and the article concept.

Aleksey N. Kosterev prepared and edited the materials of the article, performed their analysis.

Evgenia D. Valkova collected and summarized the data on the research problem, analysed the obtained materials.

Viktor V. Matytsin prepared and edited the text of the article.

#### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов 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 11.06.2024; одобрена после рецензирования 15.08.2024; принята к публикации 16.09.2024.

The article was submitted 11.06.2024; approved after reviewing 15.08.2024; accepted for publication 16.09.2024



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

Научная статья

УДК 553.9

EDN: BRKZHA

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-329-341



### Осинский резервуар – модель геофлюидодинамической системы: очаги генерации, пути миграции и местоскопления углеводородов

Л.А. Рапацкая<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель данного исследования заключалась в представлении результатов анализа закономерностей распределения скоплений углеводородов на примере осинского продуктивного горизонта как регионального резервуара углеводородов – самостоятельной геофлюидодинамической системы. В работе использованы данные результатов буровых и геофизических работ, а также материалы исследований, опубликованных в открытой печати. На площади нефтегазоносных областей юга ряда тектонических структур Сибирской платформы (Ангаро-Ленской ступени, Байкитской антеклизы, юго-западной части Непско-Ботуобинской антеклизы, зоны Ангарских складок) широко распространены продуктивные нефтегазоносные горизонты, залегающим в низах кембрийского разреза, является осинский. По результатам нефтепоисковых работ, осинский горизонт – единственный стратиграфический уровень карбонатного комплекса венда – нижнего кембрия, характеризующийся региональной нефтегазоносностью. Условия образования флюидодинамической системы осинского мегарезервуара определяются характером литолого-фациальной обстановки формирования, обусловившей его геологическую неоднородность, особенности литологического состава, широкое площадное распространение в структурах нефтегазоносных областей, возможные пути миграции углеводородов из очагов генерации. Каждая геофлюидодинамическая система состоит из очагов генерации нефти и газа, каналов путей миграции, природных вмещилищ углеводородов – резервуаров и ловушек, пород-коллекторов и флюидоупоров, а также контролируется благоприятным сочетанием этих факторов в геологическом времени и пространстве. Ординарная флюидодинамическая система представлена углеводородными растворителями в очагах генерации нефти и газа, которые являются местом дефлюидизации нефтегазоматеринских пород осадочного нефтегазоносного бассейна. К осинскому горизонту в центральных районах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции приурочены залежи различного фазового состава углеводородов Марковского, Даниловского, Пилюдинского, Ярактинского, Чаяндинского, Среднеботуобинского, Талаканского, Ковыктинского и других месторождений, на которых доказана его промышленная продуктивность. Среднеусольский осинский резервуар регионально нефтегазоносен в нефтегазоносных областях Байкитской и Непско-Ботуобинской антеклиз, Ангаро-Ленской ступени и зоне Ангарских складок. В настоящее время с осинским горизонтом связаны дальнейшие перспективы прироста ресурсов углеводородов в венд-нижнекембрийском карбонатном комплексе.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, продуктивные горизонты, геофлюидодинамическая система, осинский региональный резервуар, нефтегазоносные осадочные бассейны, очаги генерации и пути миграции углеводородов

**Для цитирования:** Рапацкая Л.А. Осинский резервуар – модель геофлюидодинамической системы: очаги генерации, пути миграции и местоскопления углеводородов // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 329–341. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-329-341>. EDN: BRKZHA.

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

## Original article

**The Osinsky reservoir as a model of a geofluidodynamic system: hydrocarbon generation centres, migration routes and accumulation sites**Larisa A. Rapatskaya<sup>a✉</sup><sup>a</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** The objective of the study is to present the analysis results of the distribution patterns of hydrocarbon accumulations for the case of the Osinsky productive horizon as a regional hydrocarbon reservoir and an independent geofluidodynamic system. The work uses the drilling and geophysical operation data, as well as research materials published in the open press. The Osinsky oil and gas horizon occurring in the lower parts of the Cambrian section is a widespread productive horizon in the area of oil and gas-bearing regions in the south of a number of tectonic structures of the Siberian platform (Angara-Lena bench, Baikit anteklise, southwestern part of the Nepa-Botuoba anteklise, Angara fold zone). The obtained oil exploration results showed that the Osinsky horizon is the only stratigraphic level of the Vendian-Lower Cambrian carbonate complex characterized by regional oil and gas potential. The formation conditions of the fluid dynamic system of the Osinsky mega-reservoir are determined by the nature of the lithological-facies formation environment, which determined its geological heterogeneity, features of its lithological composition, wide areal distribution in the structures of oil and gas bearing regions, possible migration routes of hydrocarbons from generation centres. Each geofluidodynamic system consists of oil and gas generation centres, migration route channels, natural containers of hydrocarbons – reservoirs and traps, reservoir rocks and seal rocks, and is also controlled by a favourable combination of these factors in geological time and space. The ordinary fluid dynamic system is represented by hydrocarbon solutions in the oil and gas generation centres, which are the defluidization places of oil and gas source rocks of the sedimentary oil and gas basin. The Osinsky horizon in the central regions of the Lena-Tunguska oil and gas province is associated with the deposits of various phase composition of hydrocarbons of the Markovskoye, Danilovskoye, Pilyudinskoye, Yarakinskoye, Chayandinskoye, Srednebotuobinskoye, Talakanskoye, Kovyktinskoye and other fields, where its industrial productivity has been proven. The Sredne-Usolsky Osinsky reservoir is regionally oil and gas bearing in the oil and gas bearing areas of the Baikitskaya and Nepa-Botuoba anteklise as well as the Angara-Lena bench and the zone of the Angara folds. Today, the Osinsky horizon is associated with further growing prospects of hydrocarbon resources in the Vendian-Lower Cambrian carbonate complex.

**Keywords:** Siberian platform, productive horizons, geofluidodynamic system, Osinsky regional reservoir, oil and gas-bearing sedimentary basins, hydrocarbon generation centres and migration routes

**For citation:** Rapatskaya L.A. The Osinsky reservoir as a model of a geofluidodynamic system: hydrocarbon generation centres, migration routes and accumulation sites. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):329-341. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-329-341>. EDN: BRKZHA.

**Введение**

Поиски на Сибирской платформе нефтегазоносных резервуаров, обладающих промышленной и эффективной флюидоотдачей, являются одной из важнейших задач современной геологии нефти и газа [1]. Академик А.Э. Конторович дал следующее определение понятия «резервуар нефти и газа»: «...толща, свита, подсвита, пачка, горизонт, пласт, пронцаемые породы, гидродинамически связанные между собой» [2, 3].

Понятие флюидодинамической составляющей определил В.Г. Кузнецов: «резервуар нефти и газа, природный резервуар –

геологическое тело, представляющее собой ассоциацию горных пород, в котором могут содержаться и циркулировать флюиды и которое ограничено практически непроницаемыми породами»<sup>1</sup>. Г.Г. Шемин предложил двухпараметрическую систему классификации крупных нефтегазолокализирующих объектов, согласно которой мегарезервуары выделяются по стратиграфическому объему и распространяются в масштабе нефтегазогеологического этажа, а по площади распространения резервуары делятся на суперрегиональные, субрегиональные и локальные [4].

<sup>1</sup> Кузнецов В.Г. Литология природных резервуаров нефти и газа: учебник для студентов. М.: Изд-во ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. 264 с. EDN: KVZFDG.



Например, в пределах Восточной Сибири в состав вендско-кембрийского регионально-го мегарезервуара углеводородов включены кембрийский, верхневендско-нижнекембрийский и вендский региональные макрорезервуары [5].

В основе предлагаемой автором геофлюидодинамической модели осинского резервуара лежат представления о нефтегазообразовании как универсальном процессе, закономерно сопровождающем развитие осадочного нефтегазоносного бассейна.

### Материалы и методы исследования

Осинский горизонт является одним из наиболее распространенных продуктивных нефтегазоносных горизонтов и наиболее выдержанным нижнекембрийским нефтегазоносным региональным резервуаром на юге Сибирской платформы [6]. Выделение осинского горизонта в литолого-стратиграфическом разрезе основано на литологических признаках: его нижняя граница проводится по кровле подосинских солей, а верхняя граница – по подошве нижнего пласта каменной соли. Другими словами, к осинскому горизонту относится карбонатная толща пород водорослевой фации, залегающая в нижней

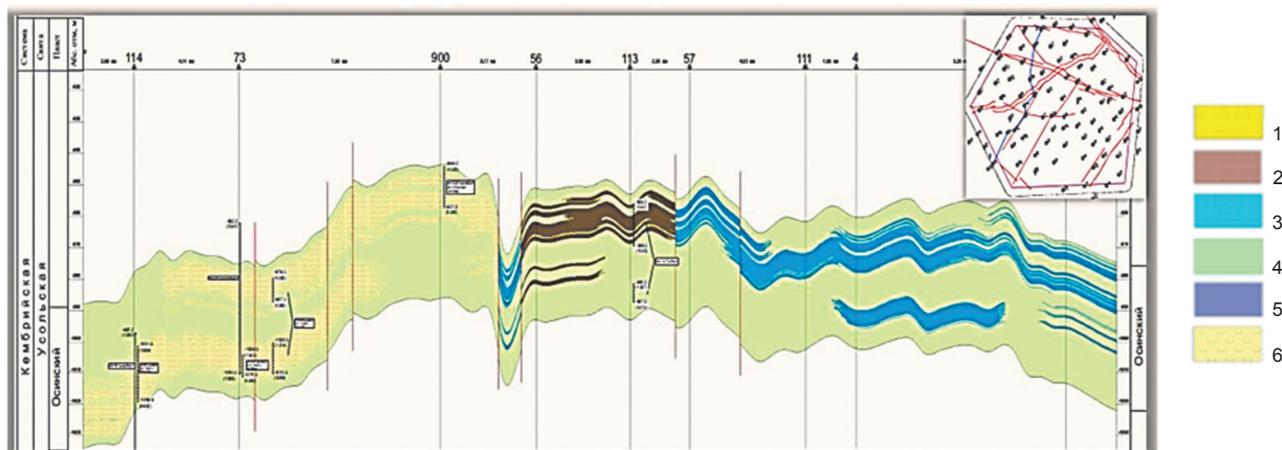
части усольской свиты между подстилающими и перекрывающими пачками каменных солей<sup>2</sup> [7].

С точки зрения региональной стратиграфии, Осинский горизонт соответствует одноименному подгоризнту усольского горизонта и по своим особенностям может позиционироваться как региональный резервуар (рис. 1).

Отличительной особенностью Осинского горизонта является высокая степень геологической (литолого-петрофизической) неоднородности, обусловленная фациальной изменчивостью отложений на площадях распространения и широким спектром вторичных изменений: перекристаллизацией, кальцитизацией, доломитизацией, выщелачиванием и трещиноватостью [8].

В Осинском горизонте на месторождениях углеводородов обнаружены залежи разного фазового состава, для него характерны пластовые давления, как правило, превышающие нормальное гидростатическое давление, а на отдельных площадях фиксируется аномально высокое пластовое давление с коэффициентом аномальности до 1, 3 и более.

В основном горизонт сложен карбонатными породами: темно-серыми известковистыми доломитами, известняками, их переходными



**Рис. 1. Геологический разрез осинского горизонта по скважинам «Проект Верхнечонскнефтегаз» ООО «Транснерудцентр»:**

1 – газонасыщенный коллектор; 2 – нефтенасыщенный коллектор; 3 – водонасыщенный коллектор; 4 – неколлектор; 5 – засоленный неколлектор; 6 – кора выветривания

**Fig. 1. Geological section of the Osinsky horizon by the wells of “Verkhnechonskneftegaz Project” of LLC “Transnerudcenter”:**

1 – gas-saturated reservoir; 2 – oil-saturated reservoir; 3 – water-saturated reservoir; 4 – non-reservoir; 5 – saline non-reservoir; 6 – weathering crust

<sup>2</sup> Решения Четвертого межведомственного регионального стратиграфического совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и нижнего кембрия внутренних районов Сибирской платформы. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1989. 64 с.



разновидностями, в различной степени глинистыми, иногда горизонтально-полосчатыми, солями. Общая мощность горизонта варьируется от 25 до 120 м (рис. 2).

Горизонт широко распространен в разрезах многих месторождений углеводородов в нефтегазоносных областях на площадях тектонических структур Сибирской платформы: Ангаро-Ленской ступени, Непско-Ботуобинской и Байкитской антеклиз и Ангарской зоны складок (таблица).

В 1989 г. на Всесоюзном совещании в Ашхабаде Б.А. Соколов и В.Е. Хаин представили (гео)флюидодинамическую модель нефтегазообразования в осадочных бассейнах [9]. Признание роли флюидодинамического фактора в процессах генерации углеводородов является обоснованием для оценки объективных закономерностей размещения нефтегазовых залежей в осадочных нефтегазоносных бассейнах. Флюидодинамический фактор позволяет рассматривать эволюцию нефтегазоносного бассейна в процессе его динамического развития с учетом реализации генерационного потенциала органической массы, миграции и аккумуляции углеводородов и разрушения их скоплений.

В основе флюидодинамической концепции нефтегазообразования лежит представление о единстве триады флюидодинамической системы, в структуру которой входят [10]:

- место образования флюидов – очаг генерации;
- пути движения флюидов – каналы миграции;
- зоны аккумуляции флюидов – местоскопления углеводородов.

В вещественном физико-химическом выражении эту триаду можно представить как нефтегазоносный комплекс, в состав которого входит местоскопление – резервуар (ловушка), коллектор и флюидоупор.

На Сибирской платформе широко распространены рифейские осадочные бассейны, связанные с рифтогенными структурами, к которым, по данным академика А.Э. Конторовича и других авторов, приурочены крупнейшие рифейские очаги нафтидообразования – основные источники углеводородов рифея и нижнего кембрия. Сибирский кратон находится почти в сплошном кольце рифтогенных структур самого разного возраста. Важным событием в геодинамической истории Сибирской платформы в раннерифейское время

Система	Отдел	Ярус	Горизонт	Индекс	Литологическая колонка	Мощность, м	Характеристика подразделений
К Е М Б Р И Й С К А Я	Н И Ж Н И Й	Л Е Н С К И Й	ОСИНСКИЙ	$\epsilon_{1,an+lt}$		606	Ангарская и литвинцевская свиты объединенные. Доломиты, каменная соль с прослоями доломитизированных известняков, песчаников. Доломиты с прослоями доломитизированных известняков, песчаников. Доломиты с включениями гипса, ангидрита и кремня. Фауна: Proasaphiscus sibiricus N. Tchern. P. sp
				$\epsilon_{1,bl}$		130	Булайская свита. Доломиты с прослоями известняков, линзами карбонатных брекчий и включениями кремней. Фауна: Binodaspis sp., Proerbia sp., Acrotreta sp., Bathyriscellus robustus Term., Tungusella cfobera Rep
				$\epsilon_{1,bls}$		521	Бельская свита. Доломиты с прослоями брекчесвидных, засоленных и гипс-ангидритовых доломитов, известняков; каменная соль
				$\epsilon_{1,us}$		418	Усольская свита. Каменная соль, доломиты, реже известняки с прослоями доломито-ангидритов

Рис. 2. Литолого-стратиграфический разрез осинского горизонта  
Fig. 2. Lithological and stratigraphic section of the Osinsky horizon



**Тектоническая приуроченность месторождений нефти и газа Сибирской платформы**  
**Tectonic confinement of oil and gas fields of the Siberian platform**

Месторождение, фазовый состав	Тектоническая приуроченность	Литологический состав	Толщина, м
<b>Ангаро-Ленская ступень</b>			
Братское газоконденсатное	Братский выступ Ангаро-Ленской ступени	Известняки, известняки органогенные, известковистые доломиты и доломиты. Долериты 70–132 м	70–90
Атовское газоконденсатное	Южная часть Ангаро-Ленской ступени	Карбонатные породы разного состава со слоями каменной соли	50
Ковыктинское газоконденсатное	Ковыктинский выступ Ангаро-Ленской ступени	Доломиты и известняки темно-серые трещиноватые с подчиненными прослоями ангидрито-доломитов и доломитов глинистых	50
Чиканское газоконденсатное	Северо-восточная часть Ангаро-Ленской ступени	Известняки и известковистые доломиты темно-серые с преобладанием слоев каменной соли. Долериты 23–42–123 м	57
Ангаро-Ленское газовое	Ангаро-Ленская ступень	Известняки, известковистые доломиты серые, темно-серые в верхней части с прослоями доломито-ангидритов	52
Тутурское газоконденсатное	Ангаро-Ленская ступень	Доломиты, известняки, доломиты ангидритистые органогенные и кавернозные плотные. Долериты 10 м	60
<b>Непско-Ботубинская антеклиз (НБА)</b>			
Алинское нефтегазовое	Непский свод НБА	Карбонаты разного состава со слоями каменной соли	–
Западно-Аянское нефтегазоконденсатное	Юго-восточный склон Непского свода НБА	Доломиты серые, реже известняки и известковистые доломиты с незначительными прослоями ангидрито-доломитов и глинистых доломитов. Долериты 70–132 м	40–74
Марковское нефтегазоконденсатное	Южная часть НБА	Известняки, прослоями органогенные и доломитизированные, доломиты известковистые, ангидрито-доломиты, доломиты в верхней части засоленные трещиноватые с единичными тонкими прослоями каменной соли	40–104
Даниловское нефтегазоконденсатное	Юго-западный склон Непского свода НБА	Известняки, глинистые известняки с редкими прослоями доломитов. Долериты 90 м	60–129
Дулисьминское нефтегазоконденсатное	Юго-западный склон Непского свода НБА	Известняки серые органогенные доломитизированные засоленные с прослоями доломитов и доломитов глинистых. Долериты 112–120 м	65–90
Пилюдинское нефтяное	Юго-восточный склон НБА	Известняки доломитизированные, доломиты микрофитолитовые водорослевые	25–70
Могдинское нефтегазоконденсатное	Северо-западный склон НБА	Доломиты темно-серые известковистые и известняки, а также их переходные разновидности в различной степени глинистые, горизонтально-полосчатые, кавернозные, ангидритизированные, засоленные	35–60
Вакунайское нефтегазоконденсатное	Непско-Пеледуйский свод НБА	Известняки и доломиты	–
Тымпучиканское нефтегазовое	Центральная часть НБА	Доломиты серые, местами трещиноватые плитчато-слоистые ангидритизированные глинистые, с прослоями аргиллитов и доломитизированных мергелей	50
Талаканское нефтегазоконденсатное	Непско-Пеледуйский свод НБА	Известняки серые ступково-фитогенные доломитизированные с прослоями доломитов известковистых, местами порово-кавернозных и кавернозно-трещиноватых	60–80
Верхнечонское нефтегазоконденсатное	Непский свод НБА, Верхнечонский структурный мыс	Известняки водорослевые прослоями доломитизированные, ангидрито-доломиты, доломиты с глинистой примесью, редко тонкие прослои мергелей. Долериты 250–310 м	48–53



Верхнеичерское нефтегазоконденсатное	Непский свод НБА	Известняки серые прослоями доломитизированные глинистые кавернозные и пористые. Долериты	50
им. Лисовского газонефтяное	Непский свод НБА	Доломиты, известняки доломитизированные участками кавернозные пористые	44–93
Игнялинское	Непский свод НБА	–	–
Ярактинское нефтегазоконденсатное	Юго-восточный склон НБА	Чередование пластов светло-серых известняков, известковистых доломитов и доломитов участками кавернозных с ангидритами и пластами каменной соли. Долериты	51–75
Чаяндинское	Восточный склон Непского свода НБА	Известняки и доломиты с подчиненными прослоями мергелей и аргиллитов	38–60
Ичединское нефтяное	Юго-западный склон Непско-Ботуобинского свода НБА	Доломиты серые известковистые, известняки местами кавернозные с незначительными прослоями ангидрито-доломитов и глинистых доломитов. Долериты 34–146 м	51–75
Большетирское нефтегазоконденсатное	Юго-западной склон НБА в зоне сочленения с Ангаро-Ленской ступенью	Известняки, известковистые доломиты, ангидрито-доломиты темно-серые мелкозернистые биогермные, среднеплитчатые участками кавернозные. Долериты 180 м	50
Верхнетирское нефтяное	Юго-западной склон НБА в зоне сочленения с Ангаро-Ленской ступенью	Известняки, доломиты биогермные комковато-сугустковые горизонтально-слоистые, ангидрито-доломиты	50
Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное	Мирнинский свод НБА	Известняки серые массивные органогенные доломитизированные, доломиты и глинистые доломиты. Долериты 218–355 м	105
Тас-Юряхское нефтегазоконденсатное	Мирнинский свод НБА	Доломиты и известняки. Долериты	
Чайкинское газоконденсатное	Зона сочленения НБА и Предпатомского прогиба	Доломиты и известняки, в основании глинистые доломиты	50
Байкитская антеклиза (БА)			
Оморинское нефтегазоконденсатное	Камовский свод БА	Доломиты серые прослоями известковистые средне- и мелкозернистые плотные, реже кавернозные со стилолитовыми швами с прослоями каменной соли	30
Юрубчено-Тохомское газонефтяное	Камовский свод БА	Переслаивающиеся пласты каменной соли, доломитов и известняков, иногда водорослевых. Доломиты темно-серые, мелко- и среднезернистые, массивные и слоистые неравномерно глинистые (до доломитовых мергелей) и ангидритистые (до доломито-ангидритов). Долериты	75–90
Куюмбинское нефтегазое	Камовский свод БА	Доломиты серые, известняки доломитизированные ангидритистые, иногда водорослевые с прослоями глинистых доломитов и доломитовых мергелей. Долериты	70
Ангарская зона складок			
Агалеевское газоконденсатное	Ангарская зона складок	–	–
Абаканское газоконденсатное	Ангарская зона складок	–	–
Берямбинское газоконденсатное	Ковинская антиклиналь юго-восточной зоны ангарских складок	Доломиты серые, известняки доломитизированные, иногда водорослевые, кавернозные и трещиноватые со стилолитовыми швами, с прослоями ангидритистых глинистых доломитов и доломитовых мергелей	60
Ильбокичское газоконденсатное	Ангарская зона складок	–	–
Имбинское газоконденсатное	Ангарская зона складок	–	–



стало раскрытие континентальных рифтов, положивших начало образованию рифейских осадочных бассейнов, сыгравших основополагающую роль в генерации углеводородов. В течение практически всего рифея как по вновь образованным западным, южным и северным, так и по унаследованным от суперконтинента восточным границам кратона сформировались пассивные и активные окраины континента. В континентальных рифтах вдоль современных южных окраин Сибирской платформы образовались очаги генерации с мощными нафтидогенерирующими отложениями рифейского возраста [11]. Пространственное сочетание очагов нефтегазообразования и зон нефтегазонакопления предопределило современные закономерности размещения месторождений нефти и газа на юге Сибирской платформы [11].

Генерация углеводородов обусловила формирование гигантских скоплений нефти и газа в рифее и венде на Байкитской антеклизе и Катангской седловине, в венде и нижнем кембрии Непско-Ботубинской антеклизы, Ангаро-Ленской ступени и зоне Ангарских складок.

На юго-западе кратона сформировался Кулумбинский рифт – высокоэнергетическая и высокопроницаемая литосферная структура, контролирующая основные особенности процессов нафтидогенеза в древних (верхнепротерозойских) толщах Байкитско-Катангского региона Восточной Сибири с оптимальными условиями для транзита глубинных флюидных потоков [12].

К этому рифту приурочен самый древний на планете верхнепротерозойский Кулумбинско-Юрубчено-Тохомский ареал нефтегазонакопления, который, вероятно, служил местом для разгрузки флюидов, мигрировавших из Чуньского рифей-вендского осадочного бассейна, с мощностью рифейских отложений до 5–7 км, где и сформировался крупный Чуньско-Котуйский палеочаг. К югу от него расположены еще два очага: Иркиннеево-Ванаварский с мощностью рифея в центральной части 6–15 км, переходящий к западу в Енисейский региональный палеочаг, связанный с мощными черносланцевыми толщами Енисейского кряжа (территориально совпадающий с регионом современного Енисейского кряжа) [13].

Чуньский рифей-венд-кембрийский осадочный нефтегазоносный бассейн выявлен

сейсморазведкой в 2003–2005 гг. Установленная площадь бассейна – 40 тыс. км<sup>2</sup>, предполагаемая – свыше 150 тыс. км<sup>2</sup>. Основные перспективы нефтегазоносности Чуньского рифей-вендского осадочного бассейна связаны с рифейским, вендским, верхневендско-нижнекембрийским нефтегазоносными комплексами, а также с перекрывающими отложениями нижнего кембрия [2, 13].

Продолжительность эволюции Чуньского рифей-венд-кембрийского бассейна и большие массы накопленной органики послужили основанием формирования очага генерации как источника для местоскоплений углеводородов четырех нефтегазоносных комплексов (НГК) на территории Сибирской платформы: рифейского, вендского, верхневендско-нижнекембрийского и кембрийского. По оценке нефтяных подразделений Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья, начальные геологические ресурсы Чуньского бассейна составляли: для рифейского НГК – 6219 млн т условных углеводородов, для вендского терригенного НГК – 3818 млн, для верхневендско-нижнекембрийского карбонатного НГК – более 1000 млн [13].

Максимальная вероятность обнаружения залежей углеводородов на востоке Чуньского бассейна связывается с зоной несогласного залегания рифейских и вендских отложений по границе с Непско-Ботубинской антеклизой, а на западе – с зоной клавишного строения рифейского комплекса, примыкающей к Байкитской антеклизе и Бахтинскому мегавыступу [14]. Здесь следует акцентировать внимание на такой важной детали: в наиболее прогнутой части бассейна отложения рифея перекрыты вендскими толщами без резких несогласий, что несомненно определяет разноориентированное направление миграционных потоков углеводородов из центральных частей бассейна на запад, юго-запад и восток по разуплотненным зонам вдоль поверхности несогласия между рифеем и вендом, то есть в какой-то степени определяет направление каналов миграции углеводородов. О строении рифейского разреза восточной части Чуньского бассейна можно судить по данным глубокого бурения на Катангской седловине.

На юго-востоке Сибирской платформы очаг генерации углеводородов сформировался, вероятно, в Предпатомском региональном прогибе. Предпатомский региональ-



ный прогиб обрамляет с запада, севера и востока Байкало-Патомское нагорье и служит основной областью миграции углеводородов месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы и частью транзитной территории, через которую осуществлялась миграция углеводородов из Предпатомского осадочного палеобассейна.

В палеоплане палеобассейн, как указывал А.Э. Конторович, занимал значительно большую территорию, а 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 [14].

Наиболее интенсивно процессы генерации углеводородов протекали в венд-кембрийское время. При этом рифейские нефтематеринские толщи попали в главную зону нефтеобразования («нефтяное окно») в вендском периоде, а нефтематеринские толщи венда – в кембрийском. В кембрии же накопились мощные галогенно-карбонатные толщи-флюидоупоры, которые могли сохранять залежи углеводородов длительное время [15].

Особое внимание в отношении перспектив нефтегазоносности рифея привлекает Предпатомский передовой прогиб, где наблюдается большая мощность рифейских толщ, а исследователи считают его палеоочагом генерации углеводородов. А.В. Мигурским с соавторами разработана модель покровно-надвигового строения Предпатомского передового прогиба, смежных частей Непско-Ботуобинской антеклизы и Ангаро-Ленской ступени с масштабным (на десятки километров) перемещением сорванных покровов, что сопровождалось интенсивной латеральной миграцией флюидов со стороны складчатой области внутрь Сибирской платформы [16].

Несомненный факт, подтверждающий латеральную миграцию флюидов из Предпатомского передового прогиба, представляет открытие Чайкинского газоконденсатного месторождения, приуроченного к Чайкинской кольцевой структуре (Чайкинскому поднятию) в зоне сочленения Непско-Ботуобинской антеклизы и Предпатомского передового прогиба. По расчетам А.В. Мигурского, период главной латеральной миграции углеводородов из Байкало-Патомской складчатой области на Сибирской платформе проходил на рубеже

силура – девона, когда Предпатомский передовой прогиб представлял собой крупную ловушку площадью от 160 до 800 км<sup>2</sup> и амплитудой порядка 200 м, расположенную на пути мигрирующих углеводородов [17, 18].

По мнению А.А. Трофимука и других авторов, именно рифейские отложения с позиции онтогенеза нефтидов являются первым масштабным источником генерации углеводородов планеты, сформировавших в том числе геологические запасы углеводородов Восточной Сибири [19].

На территории Сибирской платформы в литолого-стратиграфических разрезах нефтегазоносных областей выделяются несколько региональных НГК, из которых наиболее продуктивны рифейско-вендский НГК Байкинской антеклизы и вендско-кембрийский нефтегазоконденсатный комплекс Ангаро-Ленской ступени, Непско-Ботуобинской антеклизы и зоны Ангарских складок.

Академик А.Э. Конторович с соавторами считает, что основным источником нефти и газа для месторождений рифея – нижнего кембрия Сибирской платформы служили рифейские очаги генерации углеводородов, но по составу нефти Байкинской антеклизы старше остальных нефтей юга Сибирской платформы, так как в их составе большая часть – вклад рифейского источника, а в целом основным источником нефтей авторы считают венд. Отличие в составе углеводородов-биомаркеров в нефтях Байкинской антеклизы привело к предположению, что их возраст старше, чем возраст нефтей Непско-Ботуобинской антеклизы [14].

Следует отметить, что состав нефтей из продуктивных отложений разного возраста меняется по разрезу. Нефть из отложений рифея и венда нефтенометанового типа плотностью 0,8–0,86 г/см<sup>3</sup>, малосернистая – 0,1–0,28 % серы, с содержанием смол в интервале 0,8–14,28 % масс., парафинов – 0,3–3,3 % масс. Плотность нефти из терригенных толщ венда – нижнего кембрия изменяется от 0,8 до 0,88 г/см<sup>3</sup>, содержит повышенные количества серы (0,28–1 % масс.) и смол (до 15,5 % масс.). Нефти карбонатов осинского горизонта венда – нижнего кембрия имеют плотность 0,8–0,9 г/см<sup>3</sup>, доля серы составляет 0,1–1,4 % масс., смол – 1–24 % масс., отмечено наименьшее количество метаново-нафтеновых углеводородов (61–63 % масс.). В то же время, по многочисленным данным, нефти Си-



бирской платформы относятся к единому генетическому типу, для которого характерно преобладание метановых углеводородов [20].

Межсолевые отложения нижнего и среднего кембрия содержат целый ряд нефтегазоносных резервуаров, которые различаются как по условиям залегания, так и по своим емкостным и коллекторским свойствам. К ним приурочены многие месторождения нефти и газа на Сибирской платформе.

Осинский горизонт, входящий в состав вендско-кембрийского комплекса, по всем классификационным признакам можно выделить в усольский региональный резервуар, распространенный на большей части Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. По классификации резервуаров, приведенной в работах А.Э. Конторовича, Н.В. Мельникова, Г.Г. Шемина и других исследователей, на основании стратиграфического объема и площади их распространения отложения венда и кембрия Сибирской платформы подразделяются на мега-, макро- и мезорезервуары. Каждый мезорезервуар, в свою очередь, подразделяется на несколько пластов [4, 21].

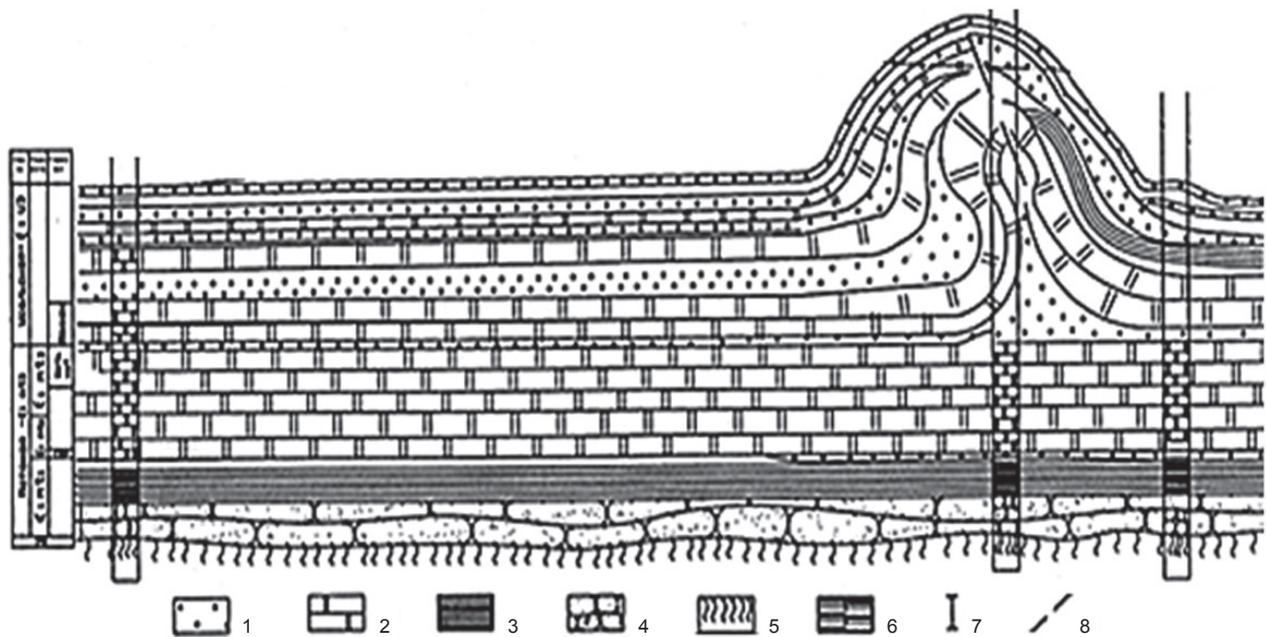
Среднеусольский региональный макрорезервуар соответствует осинскому горизонту, осинскому региональному резервуару среднеусольской подсвиты усольской свиты и входит в состав верхневендско-нижнекембрийского мегарезервуара. Резервуар нефтегазоносен на площадях нефтегазоносных областей Ангаро-Ленской ступени, Непско-Ботуобинской и Байкитской антеклиз и зоны Ангарских складок (см. таблицу). Залежи нефти и газа выявлены на Ярактинском, Среднеботуобинском, Талаканском, Вакунайском, Верхнечонском, Марковском, Пилюдинском и ряде других месторождений. Получены также притоки углеводородов из скважин Могдинской, Санарской, Преображенской, Юктанской, Тас-Юряхской, Таранской и других площадей Непско-Ботуобинской антеклизы. Кроме газонефтяных залежей на перечисленных месторождениях продуктивность осинского резервуара установлена на Восточно-Талаканской, Хамакинской, Тымпучиканской и Вакунайско площадях.

Осинский горизонт распространен на площади нескольких структурно-тектонических элементов Сибирской платформы (соответственно, нефтегазоносных областей) (см. таблицу). Горизонт характеризуется регио-

нальной нефтегазоносностью, различным фазовым составом залежей, линейной формой распространения, незначительным диапазоном изменения мощностей, литолого-петрофизической неоднородностью, обусловленной фациальной изменчивостью и широким спектром вторичных преобразований: перекристаллизацией, кальцитизацией, доломитизацией, выщелачиванием, трещинообразованием. Представлен горизонт преимущественно известняками и доломитами, часто органогенно-обломочными и водорослевыми, кавернозными, иногда глинистыми, ангидритизированными, с прослоями ангидритов и солей. Мощность его изменяется от 20–30 до 100–120 м. Тип коллектора осинского горизонта трещинно-поровый, в меньшей степени каверново-поровый, с открытой пористостью не более 8–9 % при величине проницаемости от первых единиц до  $80 \times (10-15)$  м. Осинский горизонт содержит археоциаты родов *Robustocyathus*, *Aldanocyathus*, водоросли, хиолительминты и другие органические остатки [22]. В настоящее время именно с осинским горизонтом связаны основные перспективы прироста ресурсов углеводородов в венд-нижнекембрийском карбонатном комплексе.

Такое разнообразие литологического состава Осинского горизонта вполне закономерно для характера фациальной обстановки мелководно-морского режима в бассейне седиментации в венде – кембрии на площадях тектонических структур Сибирской платформы: Ангаро-Ленской ступени, Катангской седловины, значительной части Непско-Ботуобинской и Байкитской антеклиз. На этой территории с начала венда шло наступление моря и накапливались карбонатные и карбонатно-эвапоритовые илы. В конце венда – начале кембрия на большей части внутренней области кратона сформировался огромный солеродный бассейн [14].

В осинское время в результате обширной морской трансгрессии началось понижение солености вод и формирование доломитово-известняковых осадков. В зонах больших мощностей осинского горизонта известняки, часто водорослевые, составляют 60–90 % разреза. Многочисленные микрофитолиты и остатки водорослей свидетельствуют об обилии органической жизни в это время. Толщина Осинского горизонта на Непском своде увеличивается в рифовых зонах большой



**Рис. 3. Геологический разрез Пилюдинского месторождения:**

1 – каменная соль; 2 – доломиты; 3 – аргилиты; 4 – песчаники; 5 – кристаллический фундамент;  
6 – алевролиты; 7 – интервал опробования; 8 – тектонические нарушения

**Fig. 3. Geological section of the Pilyudinsky deposit:**

1 – rock salt; 2 – dolomites; 3 – mudstones; 4 – sandstones; 5 – crystalline basement;  
6 – siltstones; 7 – sampling interval; 8 – tectonic disturbances

протяженности, где и получены промышленные притоки углеводородов [14]. Изменение толщин осинского горизонта, вероятно, обусловлено пластичными деформациями каменных солей, что хорошо прослеживается в разрезе Пилюдинского месторождения (рис. 3).

Возможен переток нефти и газа из осинского горизонта усольской свиты в вышележащие отложения бельской свиты нижнего кембрия, что обусловлено почти полным отжатием надосинских солей в сводовой части Пилюдинской структуры.

### Результаты исследования и их обсуждение

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Очаги генерации углеводородов с нефтидогенерирующими толщами больших мощностей и обильной органикой сформировались в рифей-венд-кембрийское время вдоль современных южных окраин Сибирской платформы.

2. Пространственное сочетание очагов генерации и зон нефтегазонакопления предопределило современные закономерности размещения месторождений нефти и газа на юге Сибирской платформы.

3. Генерация углеводородов обусловила формирование гигантских и крупных скоплений нефти и газа в рифее на Байкитской антеклизе и Катангской седловине, в венде – нижнем кембрии на Непско-Ботуобинской антеклизе, Ангаро-Ленской ступени и зоне Ангарских складок.

4. По разуплотненным зонам вдоль поверхности несогласия между толщами рифея и венда установилось разноориентированное направление миграционных потоков углеводородов по каналам миграции из очагов генерации в места скопления – природные резервуары, одним из которых является широко распространенный среднеусольский осинский региональный резервуар.

5. Среднеусольский осинский резервуар регионально нефтегазоносен в нефтегазоносных областях Байкитской и Непско-Ботуобинской антеклиз, Ангаро-Ленской ступени и зоне Ангарских складок.

### Заключение

Основными критериями для выделения осинского регионального резервуара в самостоятельную флюидодинамическую систему являются региональная нефтегазонасыщенность, линейная форма распространения на площадях нескольких нефтегазоносных об-



ластей, литолого-петрофизической состав пород с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами, эффективная мощность и наличие надежного флюидоупора. В настоящее

время с осинским горизонтом связаны дальнейшие перспективы прироста ресурсов углеводородов в венд-нижнекембрийском карбонатном комплексе.

#### Список источников

1. Вотинцев А.Н., Матросов К.О., Лучинина В.А., Мельников Н.В. Прогноз зоны локализации залежей углеводородов в осинском горизонте в пределах Байкитской антеклизы // Геология нефти и газа. 2021. № 5. С. 34–44. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-5-34-44>.
2. Конторович А.Э., Сурков В.С., Трофимук А.А., Шемин Г.Г., Бакин В.Е., Воробьев В.Н. [и др.]. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 7. Непско-Ботуобинский регион: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1994. 76 с. EDN: ZFGQZH.
3. Liu X.-P., Jin Z.-J., Bai G.-P., Guan M., Liu J., Pan Q.-H., et al. Formation and distribution characteristics of Proterozoic – Lower Paleozoic marine giant oil and gas fields worldwide // Petroleum Science. 2017. Vol. 14. P. 237–260. <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0154-5>.
4. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина): монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 466 с. EDN: QKHHUT.
5. Фомин А.М., Моисеев С.А. Характеристика резервуаров нефти и газа в кембрийских отложениях центральной части Сибирской платформы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2019. Т. 2. № 1. С. 183–191. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-1-183-191>. EDN: SZSLLV.
6. Рапацкая Л.А., Николаева Л.В., Васенёва Е.Г. Особенности литолого-фациального строения рапоносного продуктивного осинского горизонта и проблема утилизации буровых растворов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 3. С. 103–108. EDN: ТМУХНД.
7. Жарков М.А., Хоментовский В.В. Основные вопросы стратиграфии нижнего кембрия и венда юга Сибирской платформы в связи с солёностью // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 1965. № 1. С. 110–118.
8. Ванин В.А., Урядов С.А. Перспективы добычи нефти на Братском газоконденсатном месторождении // Нефтяная провинция. 2023. № 3. С. 131–146. <https://doi.org/10.25689/NP.2023.3.131-146>. EDN: HQPCQB.
9. Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геофлюидодинамическая модель нефтеобразования в осадочных бассейнах // Геодинамическая эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов: сб. ст. / отв. ред. В.Е. Хаин, А.И. Гриценко. М.: Наука, 1997. С. 5–9.
10. 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.
11. Рапацкая Л.А. Многофакторная разнополярная роль дизъюнктивной тектоники в онтогенезе углеводородов (Сибирская платформа) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2. С. 40–50. <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-40-50>. EDN: WAXNCJ.
12. Харахинов В.В., Шлёнкин С.И., Зерненинов В.А., Рябченко В.Н., Зоценко Н.А. Нефтегазоносность докембрийских толщ Курумбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазоаккумуляции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 1. С. 1–31. EDN: OYQFFF.
13. Мельников Н.В., Филипцов Ю.А., Вальчак В.И., Смирнов Е.В., Боровикова Л.В. Перспективы нефтегазоносности чуньского рифей-вендского осадочного бассейна на западе Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 3. С. 235–243. EDN: GYXOLB.
14. Конторович А.Э., Бахтуров С.Ф., Башарин А.К., Беляев С.Ю., Бурштейн Л.М., Конторович А.А. [и др.]. Разновозрастные очаги нафтидообразования и нафтидоаккумуляции на Северо-Азиатском кратоне // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 11. С. 1676–1693.
15. Вальчак В.И., Евграфов А.А., Горюнов Н.А., Бабинцев А.Ф. Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности рифейского комплекса пород юго-западной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 2. С. 289–298. EDN: NDELZD.
16. Мигурский А.В., Ефимов А.С., Старосельцев В.С. Новые направления нефтегазопоисковых работ в Предплатформском региональном прогибе (Сибирская платформа) // Геология нефти и газа. 2012. № 1. С. 21–29. EDN: ORCUAL.
17. Мигурский А.В. Главные фазы латеральной миграции углеводородов на юге Сибирской платформы // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Нефтегазоносные бассейны как саморазвивающиеся нелинейные системы: материалы III Междунар. конф. (г. Москва, 28–30 мая 1999 г.). М.: Изд-во МГУ, 1999. С. 162–164.
18. Мигурский А.В., Старосельцев В.С., Мельников Н.В., Рябкова Л.В., Соболев П.Н., Сурнин А.И. [и др.]. Опыт изучения Чайкинского поднятия – крупного объекта нефтегазопоисковых работ на Сибирской платформе // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2010. № 4. С. 14–25. EDN: NDMIDP.
19. Гришин М.П., Конторович А.Э., Ларичев А.И., Лотышев В.И., Мельников Н.В., Сурков В.С. [и др.]. Рифейские осадочные бассейны Восточно-Сибирской провинции и их нефтегазоносность // Осадочные бассейны и нефтегазоносность: материалы XXVIII сессии Междунар. геол. конгресса (г. Москва, 9–19 июля 1989 г.). М.: Наука, 1989. С. 5–12. EDN: YUKZBQ.



20. Тимошина И.Д. Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 166 с. EDN: QKFJBX.
21. Лемешко М.Н., Жуковская Е.А., Вараксина И.В. Связь нефтенасыщения карбонатных коллекторов с процессами формирования пустотного пространства (на примере древних отложений Восточной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 93–99. EDN: RAFBLZ.
22. Вараксина И.В., Иванова Н.А. Литолого-фациальная характеристика и коллекторский потенциал осинского продуктивного горизонта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 7. С. 54–63. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3521>. EDN: ZQQILK.

### References

1. Votintsev A.N., Matrosov K.O., Luchinina V.A., Melnikov N.V. Prediction of hydrocarbon accumulation zones in Osinsky horizon within Baikitsky Antecline. *Russian Oil & Gas Geology*. 2021;5:34-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-5-34-44>.
2. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Shemin G.G., Bakin V.E., Vorob'ev V.N., et al. *Oil and gas basins and regions of Siberia. Issue 7. Nepa-Botuoba region: monograph*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1994, 76 p. (In Russ.). EDN: ZFGQZH.
3. Liu X.-P., Jin Z.-J., Bai G.-P., Guan M., Liu J., Pan Q.-H., et al. Formation and distribution characteristics of Proterozoic – Lower Paleozoic marine giant oil and gas fields worldwide. *Petroleum Science*. 2017;14:237-260. <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0154-5>.
4. Schemin G.G. *Geology and petroleum potential of Vendian and Lower Cambrian deposits in the central areas of the Siberian platform*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007, 466 p. (In Russ.). EDN: QKHHUT.
5. Fomin A.M., Moiseev S.A. Characteristics of oil and gas tanks in Cambrian deposits of the central part of the Siberian platform. *Interexpo GEO-Siberia*. 2019;2(1):183-191. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-1-183-191>. EDN: SZSLLV.
6. Rapatskaya L.A., Nikolaeva L.V., Vasenyova E.G. Features of lithofacies composition of Osinsky brine-bearing producing horizon and the problem of drilling fluid disposal. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;3:103-108. (In Russ.). EDN: TMYXHJ.
7. Zharkov M.A., Khomentovskii V.V. Main problems of the Lower Cambrian and the Vendian stratigraphy of the south of the Siberian Platform in terms of salinity. *Byulleten' MOIP. Otdel Geologicheskii*. 1965;1:110-118. (In Russ.).
8. Vanin V.A., Uryadov S.A. Bratsk gas condensate field oil production prospects. *Neftyanaya Provintsiya*. 2023;3:131-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.25689/NP.2023.3.131-146>. EDN: HQPCQB.
9. Sokolov B.A., Khain V.E. Geofluidodynamic model of oil formation in sedimentary basins. In: Khain V.E., Gritsenko A.I. (eds). *Geodynamic evolution and oil and gas content of sedimentary basins*. Moscow: Nauka; 1997, p. 5-9. (In Russ.).
10. 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.
11. Rapatskaya L.A. Multifactorial and bipolar role of disjunctive tectonics in hydrocarbon ontogeny (Siberian Platform). *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;2:40-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-40-50>. EDN: WAXNCJ.
12. Kharakhinov V.V., Shlenkin S.I., Zerneninov V.A., Ryabchenko V.N., Zoshchenko N.A. Petroleum potential of Precambrian strata of Kuyumbinsko-Yurubcheno-Tokhomy oil and gas accumulation area. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2011;6(1):1-31. EDN: OYQFFF. (In Russ.).
13. Mel'nikov N.V., Filiptsov Yu.A., Val'chak V.I., Smirnov E.V., Borovikova L.V. Petroleum potential of the Riphean-Vendian Chunya sedimentary basin in the western Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2008;49(3):235-243. (In Russ.). EDN: GYXOLB.
14. Kontorovich A.E., Bakhturov S.F., Basharin A.K., Belyaev S.Yu., Burshtein L.M., Kontorovich A.A., et al. Different-age centers of naphthide formation and naphthide accumulation on the North Asian Craton. *Russian Geology and Geophysics*. 1999;40(11):1676-1693. (In Russ.).
15. Valchak V.I., Evgrafov A.A., Goryunov N.A., Babintsev A.F. Geology and petroleum potential of Riphean reservoirs in the southwestern Siberian craton. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(2):289-298. (In Russ.). EDN: NDELZD.
16. Migursky A.V., Efimov A.S., Staroseltsev V.S. New trends of petroleum exploration in Prepatom regional trough (Siberian platform). *Russian Oil & Gas Geology*. 2012;1:21-29. (In Russ.). EDN: ORCUAL.
17. Migurskii A.V. The main phases of hydrocarbons lateral migration in the south of the Siberian platform. In: *Novye idei v geologii i geokhimii nefti i gaza. Neftegazosnyye basseiny kak samorazvivayushchiesya nelineinye sistemy: materialy III Mezhdunar. konf. = New ideas in oil and gas geology and geochemistry. Oil and gas basins as self-developing nonlinear systems: materials of the 3<sup>rd</sup> International Conference*. 28–30 May 1999, Moscow. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1999, p. 162-164. (In Russ.).
18. Migursky A.V., Staroseltsev V.S., Melnikov N.V., Ryabkova L.V., Sobolev P.N., Surnin A.I., et al. Experience of the Chaikinskoye uplift study – the major object of petroleum exploration on the Siberian platform. *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2010;4:14-25. (In Russ.). EDN: NDMIDP.
19. Grishin M.P., Kontorovich A.E., Larichev A.I., Lotyshev V.I., Mel'nikov N.V., Surkov V.S., et al. Riphean sedimentary basins of the East Siberian province and their oil and gas potential. In: *Osadochnyye basseiny i neftegazosnost'*:



materialy XXVIII sessii Mezhdunar. geol. kongressa = *Sedimentary basins and oil and gas potential: proceedings of the 28<sup>th</sup> session of the International Geological Congress*. 09–19 July 1989, Moscow. Moscow: Nauka; 1989, p. 5-12. (In Russ.). EDN: YUKZBQ.

20. Timoshina I.D. *Geochemistry of organic matter of oil-producing rocks and oils of the Upper Precambrian of the south of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005, 166 p. (In Russ.). EDN: QKFJBX.

21. Lemeshko M.N., Zhukovskaya E.A., Varaksina I.V. Relationship between oil saturation of carbonate reservoirs and processes of void space formation (on example of ancient deposits of Eastern Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013;323(1):93-99. (In Russ.). EDN: RAFBLZ.

22. Varaksina I.V., Ivanova N.A. Lithofacial characteristic and reservoir potential of the Osinsky productive horizon of the Bolshetirsk deposit (Eastern Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(7):54-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3521>. EDN: ZQQILK.

#### Информация об авторе / Information about the author



##### **Рапацкая Лариса Александровна,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,  
профессор кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [raplarisa@yandex.ru](mailto: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 Engineering,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [raplarisa@yandex.ru](mailto: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 13.06.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2024; принята к публикации 18.09.2024.

The article was submitted 13.06.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 18.09.2024.

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

Обзорная статья

УДК 550.822.7

EDN: NDJVMD

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355

Современное состояние технологий колонкового бурения  
подледниковых горных породВ.С. Шадрин<sup>a✉</sup>, В.Я. Климов<sup>b</sup>, А.В. Большунов<sup>c</sup><sup>a-c</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

**Резюме.** Цель данной работы заключается в представлении обзора проектов колонкового бурения подледниковых горных пород на островах Арктики и в Антарктиде, выполненных специалистами России, Соединенных Штатов Америки, Дании и Китая. Анализ результатов отечественных и зарубежных проектов позволил выявить геолого-технические особенности колонкового бурения подледниковых горных пород, достоинства и недостатки используемых технологий, определить оптимальный тип породоразрушающего инструмента и наметить одно из возможных направлений в совершенствовании существующих технологий. Авторами предлагается рассмотреть способ бурения базального льда и подледниковых горных пород, в основу которого заложен принцип возвратно-вращательного движения породоразрушающего инструмента. Первая апробация данного способа была проведена более десяти лет назад в Санкт-Петербургском горном университете и показала положительные результаты. Однако исследования были направлены на изучение процессов, протекающих в электромеханическом приводе, и не затрагивали режимов бурения горных пород. Авторами статьи планируется проведение комплекса научно-исследовательских работ, направленных на создание технологии колонкового бурения скважин в подледниковых горных породах, основанной на возвратно-вращательном движении породоразрушающего инструмента.

**Ключевые слова:** Антарктида и Арктика, подледниковые горные породы, колонковое бурение, возвратно-вращательное движение, породоразрушающий инструмент

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

**Благодарности:** Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам лаборатории «Технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток» научного центра «Арктика» Данилу Васильевичу Сербину и Дмитрию Александровичу Васильеву за помощь в подготовке статьи.

**Для цитирования:** Шадрин В.С., Климов В.Я., Большунов А.В. Современное состояние технологий колонкового бурения подледниковых горных пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 342–355. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355>. EDN: NDJVMD.

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

Review article

## Current state of subglacial rock core drilling technologies

Vyacheslav S. Shadrin<sup>a✉</sup>, Vladimir Ya. Klimov<sup>b</sup>, Aleksei V. Bolshunov<sup>c</sup><sup>a-c</sup>Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

**Abstract.** The purpose of the study is to make an overview of subglacial rock core drilling projects on Arctic and Antarctic islands, which have been carried out by the experts from Russia, the United States of America, Denmark and China. By analyzing the outcomes of Russian and international projects, it was possible to pinpoint the technical and geological aspects of subglacial core drilling, as well as the benefits and drawbacks of the various technologies employed. Additionally, it was possible to identify the best kind of rock-cutting tool and identify a potential direction for further advancement of currently available technologies. The authors propose to consider a method for drilling basal ice and subglacial rocks, which is based on the principle of reciprocating rotary motion of the rock-cutting tool. The first evaluation test of the method

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



under discussion was carried out more than ten years ago at Saint Petersburg Mining University and the results were encouraging. However, the researches dealt mainly with the processes occurring in the electromechanical drive rather than rock drilling modes. The authors of the article intend to carry out a series of studies with the goal of developing a core drilling method based on the reciprocating rotary motion of the rock-cutting tool for wells in subglacial rocks.

**Keywords:** Antarctic and Arctic, subglacial rocks, core drilling, reciprocating rotary motion, rock-cutting tool

**Funding:** The research was performed under the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2024 no. FSRW-2024-0003.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to Danil Vasilievich Serbin and Dmitrii Aleksandrovich Vasiliev, the staff members of the laboratory "Well drilling technologies and techniques under Vostok station conditions" of the Scientific Center "Arctic" for their assistance in the preparation of the article.

**For citation:** Shadrin V.S., Klimov V.Ya., Bolshunov A.V. Current state of subglacial rock core drilling technologies. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):342-355. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355>. EDN: NDJVM D.

## Введение

Керн льда подледниковых горных пород (ПГП) и донных отложений подледниковых водоемов является уникальным природным архивом геологических, микробиологических и палеоклиматических данных, изучение которого позволяет реконструировать историю развития Земли [1–3].

На сегодняшний день практические результаты в области колонкового бурения ПГП в Антарктиде и на островах Арктики получены специалистами России, США, Дании и Китая. При реализации проектов использовались две технологии:

– бурение скважин геологоразведочными установками с использованием буровых снарядов со съемным керноприемником, адаптированных для проходки скважин в леднике и ПГП;

– бурение скважин колонковыми электро-механическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле.

Реализованные проекты показали, что применяемые технологии бурения, помимо очевидных достоинств, имеют определенные недостатки, которые в экстремальных физико-географических условиях полярных регионов с учетом сложной логистики могут оказать существенное влияние на результаты работ [4]. Поэтому создание надежных, энергоэффективных, малометаллоемких и экологически чистых технологий колонкового бурения ПГП является актуальной научно-технической задачей.

В настоящее время в лаборатории «Технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II ведутся работы, направленные на разработку новых и совершенствование существующих технологий и технических средств исследо-

вания ледников [5, 6] и подледниковых сред [7–9]. Одним из перспективных направлений является разработка технологий отбора керн-на базального льда, ПГП и донных отложений подледниковых озер [10–12].

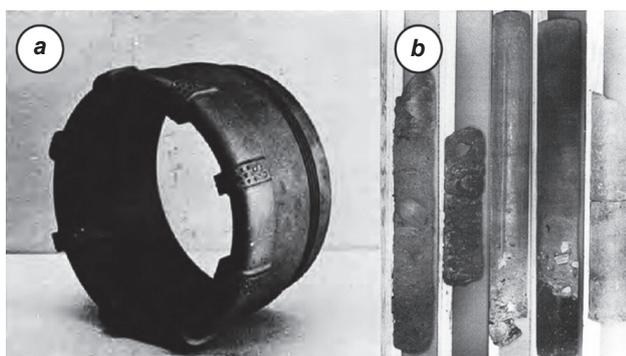
В частности, разрабатывается технология колонкового бурения скважин снарядом на грузонесущем кабеле, основанная на принципе разрушения ПГП возвратно-вращательным движением (ВВД) буровой коронки [13]. Авторы статьи предполагают, что данная технология может быть лишена указанных недостатков и позволит расширить область применения колонковых электро-механических снарядов на грузонесущем кабеле. Для обоснования эффективности разрабатываемой технологии авторами статьи планируется провести экспериментальные исследования по изучению влияния режимных параметров на механическую скорость бурения горных пород ВВД буровой коронки.

## Материалы и методы исследования

В 1966 г. специалисты США провели буровые работы на научно-исследовательской базе Camp Century в Гренландии, целью которых являлось исследование механизма движения ледяного покрова Гренландии. Основной задачей являлось колонковое бурение скважин вращательным способом с использованием электро-механического бурового снаряда CRREL на грузонесущем кабеле [14]. Для получения доступа к подледниковым отложениям был использован основной ствол скважины № 3 глубиной 1002 м, пробуренный в 1963 г. буровым снарядом CRREL, оснащенный термической коронкой. Для бурения льда с включениями обломков горных пород и подледниковых отложений был использован модернизированный снаряд CRREL, оснащенный коронкой с тремя



резцами, изготовленными из инструментальной стали, наружным и внутренним диаметрами 156 и 114 мм соответственно. В результате буровых работ 2 июля 1966 г. с глубины 1370,5 м был отобран керн льда с прослойками мелкого песка и гальки. С увеличением глубины скважины рейсовая проходка снижалась, что свидетельствовало об увеличении твердости включений горных пород во льду. Для дальнейшего бурения на снаряд была установлена алмазная однослойная коронка наружным и внутренним диаметрами 155,6 мм и 114,3 мм соответственно (рис. 1). Спустя два дня глубина скважины достигла отметки в 1387,4 м, являющейся границей между толщей льда и ПГП. Получив доступ к подледниковым отложениям, специалисты приняли решение пробурить в них дополнительно 4,55 м. Полученный керн мореносодержащего льда (общей длиной 16,9 м) и подледниковых отложений (4,55 м) был представлен обломками гнейса, гранита и метабазальтов [15]. Керн коренных пород (КП) не был отобран.



**Рис. 1. Буровой проект CRREL:**

*a – однослойная алмазная коронка для бурения подледниковых горных пород;*

*b – керн моренных отложений [14]*

**Fig. 1. CRREL drilling project:**

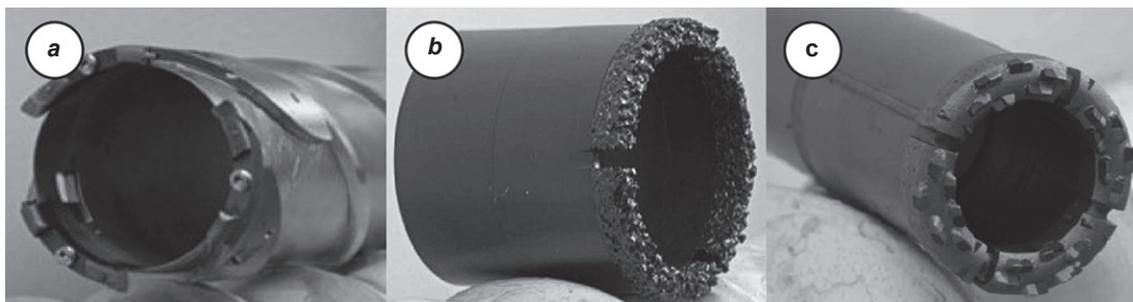
*a – single-layer diamond drill bit for subglacial core drilling; b – basal ice core [14]*

В период с 1967 по 1968 г. на станции Вурд в Западной Антарктиде буровым снарядом CRREL была пробурена скважина глубиной 2164 м. Цели и задачи проекта аналогичны целям и задачам сезона буровых работ в 1966 г. на научно-исследовательской базе Camp Century в Гренландии. При достижении глубины скважины в 2154 м наблюдалось скачкообразное изменение мощности и крутящего момента в связи с появлением твердых включений обломков горных пород на забое. В результате бурения был поднят керн длиной 2,28 м с включениями гранитной

гальки (обломков гранита) и прослоек, состоящих из мелкого песка. На глубине 2165 м на забое скважины была вскрытая водяная линза, которая не позволяла получить экологически чистый и безопасный доступ к подледниковой среде. По этой причине в 1969 г. в начале сезона буровых работ было принято решение выполнить отклонение от основного ствола скважины на глубине 2100 м и забурить дополнительный ствол, установив дополнительную секцию колонковых труб и алмазную буровую коронку наружным и внутренним диаметрами 76 и 48 мм соответственно. Доступ к подледниковой среде так и не был получен, поскольку грузонесущий кабель был оборван при спуске бурового снаряда в скважину на глубине 1545 м [16].

С 2007 по 2008 г. специалистами США были проведены буровые работы в долинах Mullins и Veason в Антарктиде [17]. С целью изучения подледниковой среды долин Mullins и Veason была выполнена модернизация переносного ручного бура. Модернизированная версия такого бура стала называться буровой установкой Kosi drill, применяемой для колонкового бурения переходной границы «Лед-ПГП». Бурение льда с включениями ПГП осуществлялось трехрезцовой коронкой по льду (рис. 2, а) и коронками, армированными дробленой твердосплавной крошкой (рис. 2, b). Для бурения ПГП с отбором керна применялись коронки, армированные термостабилизированными поликристаллическими алмазами (TSD) (рис. 2, c). В результате проведения буровых работ была пробурена скважина глубиной 10,25 м с полным отбором керна льда диаметром 80 мм с содержанием обломков ПГП. Осложнения, возникшие в ходе проведения буровых работ, были вызваны геолого-техническими особенностями бурения переходной границы «Лед-ПГП» и низкой надежностью конструкции породоразрушающего инструмента (ПРИ). Появление талой воды на забое, вызванное нагревом алмазной коронки при взаимодействии резцов с разбуриваемой ПГП, затрудняло технологический процесс и снижало механическую скорость бурения. Бурение приходилось останавливать на несколько часов до тех пор, пока температура на забое не вернется к отрицательному значению и на забое скважины вновь образуется лед.

С 2010 по 2012 г. специалистами Дании было выполнено колонковое бурение ПГП в Гренландии. Целью работ являлось получение сведений о межледниковом периоде и



**Рис. 2. Буровые коронки Koci Drill:**

*a – трехрезцовая стальная коронка; b – коронка, армированная дробленой твердосплавной крошкой; c – коронка TSD [17]*

**Fig. 2. Koci Drill bits:**

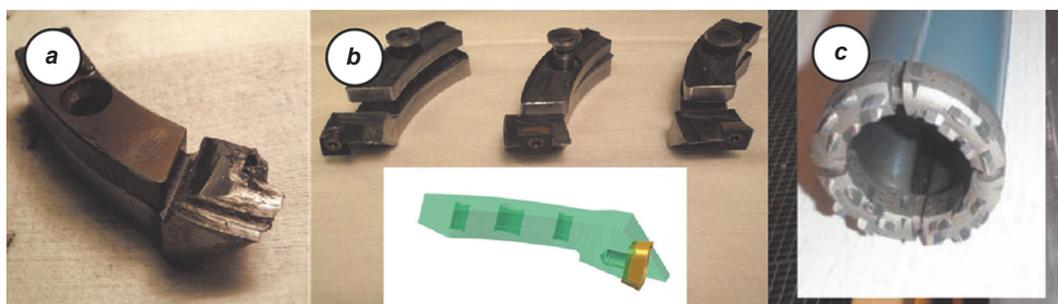
*a – three cutter steel bit; b – crushed carbide bit; c – TSD diamond bit [17]*

последнем произошедшем оледенении материка [18]. Работы проводились с применением электромеханического бурового снаряжения NEEM на грузонесущем кабеле с модернизированной системой удаления шлама с забоя [19–21]. Буровой сезон в 2010 г. являлся этапом, продолжающим предыдущий многолетний проект по глубокому бурению льда. При глубине скважины 2537,96 м ожидалось, что через два метра будет пройдена граница между льдом и КП, однако на глубине 2537,36 м буровые работы были прекращены в связи с сильным износом стальных резцов коронки наружным и внутренним диаметром 132 мм и 98 мм соответственно (рис. 3, а).

В начале бурового сезона 2011 г. бурение продолжили, применив коронку с резцами из твердого сплава (рис. 3, б). Осевую нагрузку на забой увеличили, утяжелив буровой снаряд. Таким образом удалось пробурить дополнительно 0,74 м и отобрать керн мореносодержащего льда. Причиной столь незначительной глубины бурения явилось появление крупных обломков ПГП на забое скважины, которые привели к износу твердосплавных резцов бу-

ровой коронки, и, как следствие, ее выходу из строя. В конце бурового сезона были приняты попытки пройти отметку глубины 2538,10 м с использованием коронки TSD наружным и внутренним диаметрами 51 мм и 33 мм соответственно (рис. 3, с). Однако полученный из скважины керн длиной 0,65 м представлял собой повторно замороженную талую воду с мелкодисперсным песком.

В 2012 г. буровые работы были продолжены. Специалисты из Дании повторно применили коронку с твердосплавными резцами, но это не привело к успешному результату, поскольку при первом же контакте резцов с обломками горных пород коронка вышла из строя. Дальнейшие буровые операции были проведены с применением коронки TSD (рис. 3, с). В результате выполненных работ был получен керн слоистой структуры с включениями мелкого песка, сменяющегося на керн с включениями крупных обломков гранита и кварца. При попытке возобновления работ после 10-дневного перерыва, оказалось, что 7 м призабойной части скважины были заполнены замороженной талой водой. Времени на



**Рис. 3. Породоразрушающий инструмент, используемый при бурении горизонта 2536,34–2538,1 м:**

*a – резцы коронки для бурения льда; b – резцы со вставками из сплава карбида вольфрама и кобальта; c – коронка TSD [20]*

**Fig. 3. Rock cutting tools for drilling the depths of 2536.34–2538.1 m:**

*a – ice drilling bit cutters; b – cutters with tungsten carbide and cobalt alloy inserts; c – TSD diamond bit [20]*

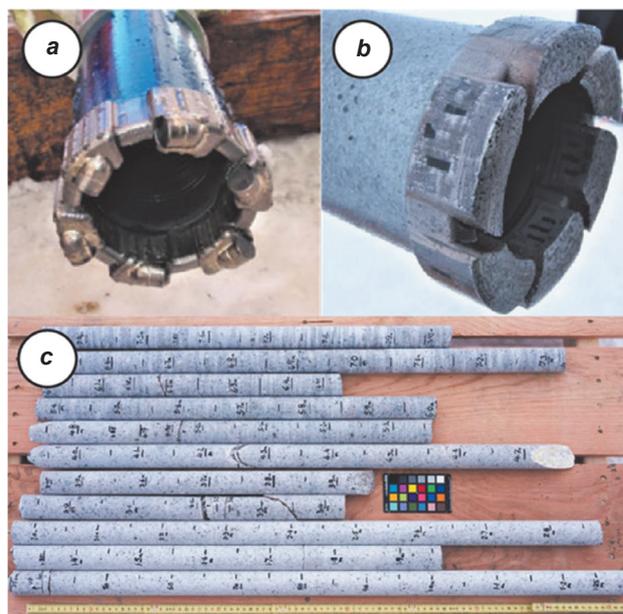


повторное разбуривание скважины не хватило. Из-за необходимости срочного завершения полевого сезона все дальнейшие работы были прекращены.

Основные осложнения, возникшие во время проведения сезонных буровых работ, были связаны с износом буровой коронки вследствие разрушения ее резцов из-за несоответствия выбранного ПРИ категории по буримости разбуриваемых горных пород. Более того, начиная с глубины бурения 2538,1 м, снижение эффективности буровых операций (или вовсе их остановка) было вызвано образованием талой воды на забое и повторным ее замерзанием.

С 2016 по 2017 гг. американскими специалистами на Пиритских Холмах в Антарктиде были проведены работы по колонковому вращательному бурению с использованием колонны бурильных труб в ПГП в рамках реализации программы Ice Drilling Program Office [22]. Задачей данного проекта являлось бурение двух скважин глубиной 100 и 200 м с извлечением из каждой скважины керна льда длиной 10 м и керны ПГП длиной 5 м. Бурение ПГП осуществлялось буровой установкой Agile Sub-Ice Geological, изготовлением которой занималась компания Multi Power Products из Келоуны, Канада. Бурение мореносодержащего льда и ПГП осуществлялось коронкой, армированной алмазно-твердосплавными пластинами (PDC-вставками) (рис. 4, а), коронкой TSD и алмазной импрегнированной буровой коронкой, наружный и внутренний диаметр которых составлял 62,5 мм и 39 мм соответственно (рис. 4, б). Первые 5 м керны гранитоидов были получены при использовании алмазной коронки с PDC-вставками с глубины 149,8 м. Следующие 3 м керны были отобраны с глубины 154,8 м с помощью алмазной импрегнированной коронки, так как коронка с PDC-вставками была изношена в процессе бурения на предыдущем рейсе (рис. 4, с). В ходе проведения буровых работ специалисты столкнулись с поглощением заливочной жидкости в трещины горных пород на забое скважины.

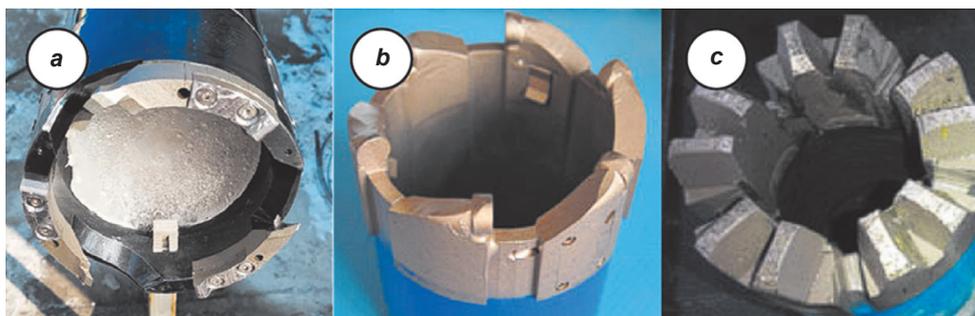
С 2018 по 2019 гг. китайские исследователи провели буровые работы в 12 км южнее станции Чжуншань в Антарктиде [23] для изучения переходной границы «Лед – ПГП» и проведения минералогического, кристаллографического и петрографического анализа образцов. Бурение ледяного покрова и



**Рис. 4. Буровой проект ASIG:**

- а – коронка с PDC-вставками;
  - б – алмазная импрегнированная коронка;
  - с – керны гранитоидов из скважины на буровой площадке № 2 [22]
- Fig. 4. ASIG drilling project:**
- a – drill bit with PDC inserts;
  - b – diamond impregnated drill bit;
  - c – granitoid cores from the drilling site no. 2 [22]

ПГП осуществлялось электромеханическим буровым снарядом IBED на грузонесущем кабеле [24, 25]. Во время проведения буровых работ в интервале глубин с 190,75 до 197,83 м наблюдалось постепенное увеличение размеров включений ПГП в ледяном керне. На глубине 197,83 м бурение было остановлено для замены резцовой коронки, предназначенной для бурения по льду из-за ее сильного износа. Бурение мореносодержащего льда и КП осуществлялось с коронкой с PDC-вставками и алмазной импрегнированной коронкой (рис. 5, б, с). Коронкой с PDC-вставками удалось пробурить лишь 0,22 м и отобрать керн мореносодержащего льда. Для продолжения бурения была использована импрегнированная коронка, что потребовало увеличения осевой нагрузки на забой скважины, поэтому было принято решение увеличить массу бурового снаряда на 100 кг. Результатом успешного применения импрегнированной коронки стал керн КП длиной 6 см, несмотря на то, что проходка за рейс была более 0,5 м. Причина подобного исхода ясна – при отрыве керн не был оторван от забоя целиком, а его часть осталась на забое скважины.



**Рис. 5. Буровые коронки IBED:**

*a – коронка со стальными резцами для бурения льда; b – коронка с PDC-вставками; c – алмазная импрегнированная коронка [24]*

**Fig. 5. IBED drill bits:**

*a – steel cutter bit for ice drilling; b – bit with PDC inserts; c – diamond impregnated drill bit [24]*

С 2019 по 2020 гг. американскими специалистами в 90 км южнее станции Мак-Мердо на мысе Минна-Блафф проводилось колонковое бурение ПГП [26]. Целью буровых работ, проводимых в рамках программы US Antarctic Program (USAP), являлось изучение ледяного покрова Антарктиды и геологии подледниковой среды. Бурение ПГП осуществлялось гидрофицированной установкой RAID с подвижным вращателем. Для бурения льда с включениями обломков ПГП применяли коронку с твердосплавными резцами и коронку с PDC-вставками наружным и внутренним диаметром 56 мм и 38 мм соответственно (рис. 6, а). Бурение КП выполнялось алмазной импрегнированной коронкой (рис. 6, а). По завершении сезона буровых работ с глубины 678 м был поднят керн тиллитов (рис. 6, b). Как таковых осложнений в ходе буровых работ не отмечалось. По итогам бурения специалистами было высказано предложение о необходимости модернизации системы удаления шлама с забоя скважины при проведении работ в следующих сезонах.

С 2016 по 2020 гг. специалисты отдела Subglacial Access Working (США) проводили буровые работы в Антарктиде на хребте Огайо (2016–2017 г.), в долине Онг (2017–2018 г.) и на горе Мерфи (проект Mount Murphy 2019–2020 г.) в рамках реализации буровой программы Ice Drilling Program (IDP) [27]. Целью работ являлось изучение процесса освобождения суши и морских акваторий от покрова налегающих и плавучих ледников (ледник Туэйтс). Бурение осуществлялось модифицированной версией буровой установки Winkie Drill с подвижным вращателем, предназначенной для колонкового бурения геологоразведочных скважин. Колонковое вращатель-

ное бурение ПГП осуществлялось коронками нескольких видов: с PDC-вставками, армированной TSD-резцами и алмазной импрегнированной коронкой. Самым эффективным ПРИ при бурении переходной границы «Лед-ПГП» оказалась коронка TSD. Осложнения при бурении были связаны с избыточным тепловыделением на забое при работе ПРИ, что приводило к растеплению стенок скважины и затрудняло технологический процесс.



**Рис. 6. Буровой проект RAID:**

*a – коронка с твердосплавными резцами, с PDC-вставками, алмазная импрегнированная коронка (слева направо); b – керн подледниковой горной породы, представленной включениями тиллитов, магматической горной породы и черного базальта [26]*

**Fig. 6. RAID drilling project:**

*a – bit with carbide inserts, with PDC inserts, diamond impregnated drill bit (from left to right); b – core of subglacial rock represented by the inclusions of tillites, igneous rock and black basalt [26]*



На хребте Огайо в результате сезона буровых работ было пробурено восемь скважин глубиной от 12,1 до 54,9 м и отобрано 2,5 м керна горных пород кристаллического фундамента. В долине Онг было пробурено две скважины глубиной 9,45 и 12,36 м и отобран керн мореносодержащего льда длиной 21,81 м диаметром 71,7 мм. У подножья горы Маунт Мерфи было пробурено шесть скважин, в четырех из которых получен керн льда (общей длиной 3,87 м и диаметром 33,5 мм) с включениями обломков гранита.

К изучению подледниковой среды проявили интерес специалисты из Великобритании. В целях получения данных для космогонического датирования и изучения динамики (отступление и расширение) ледников, ими планируется провести колонковое бурение ПГП на куполе С (Little Dome С). Технология бурения и сроки проведения запланированных буровых работ не указаны [28].

В 1988 г. специалистами Ленинградского горного института (ныне Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) в леднике Вавилова (остров Октябрьской революции, архипелаг Северная Земля) была пробурена скважина глубиной 461,61 м. Целью буровых работ являлся отбор керна из зоны контакта ледника и его ложа для определения содержания крупнообломочного материала. Бу-

рение было выполнено с помощью колонкового электромеханического снаряда КЭМС-112 на грузонесущем кабеле, оснащенного коронкой со стальными резцами наружным и внутренним диаметрами 112 мм и 86 мм соответственно. В результате бурения удалось отобрать керн длиной 4,43 м, содержащий моренные отложения. В 1999 г. на леднике Академии наук (остров Комсомолец, архипелаг Северная Земля) было выполнено колонковое бурение электромеханическим буровым снарядом КЭМС-127 на грузонесущем кабеле, оснащенным трехрезцовой стальной коронкой наружным диаметром 135 мм. Одной из главных задач экспедиции являлось колонковое бурение скважины глубиной 700 м на леднике Академии наук с последующим выходом в подледниковые отложения и отбор проб погребенного льда для палеографических исследований [29]. Колонковое бурение по подледниковым отложениям велось твердосплавной коронкой СМ-5 наружным диаметром 112 мм, а для отбора керна использовалась твердосплавная коронка СМ-3 наружным диаметром 112 мм. В 2001 г. на глубине скважины 720 м были вскрыты подледниковые отложения, по которым было пробурено 4 м с полным отбором керна. Бурение было закончено 16 мая на глубине 724 м.

В таблице представлены результаты обзора отечественных и зарубежных проектов по бурению ПГП.

#### Отечественные и зарубежные проекты колонкового бурения подледниковых горных пород Domestic and foreign subglacial core drilling projects

Год	Проект (страна)	Место бурения	Техническое средство	Тип породоразрушающего инструмента (наружный / внутренний диаметр, мм)	Керновый материал (длина керна, горная порода)
1966	CRELL program (часть гляциологической программы U.S. IGY) (США)	Научно-исследовательская база Camp Century, Северо-Запад Гренландии	Колонковый электромеханический снаряд на грузонесущем кабеле CRREL	Трехрезцовая коронка для бурения льда (156/114)	Керн мореносодержащего льда 16,9 м и подледниковых отложений 4,55 м представлен обломками гнейса, гранита и метабазальтов
1967–1968		Станция Вурд, Западная Антарктида		Алмазная однослойная коронка (155,6/114,3)	
1998	Экспериментальное бурение подстилающих пород на архипелаге Северная Земля (Россия)	Остров Октябрьской революции (ледник Вавилова)	Колонковые электромеханические снаряды на грузонесущем кабеле КЭМС	Трехрезцовая коронка для бурения льда (135/106)	Керн мореносодержащего льда 4,43 м
1999–2001		Остров Комсомолец (ледник Академии наук)		Коронки СМ-5 и СМ-3 (112/94)	Керн мореносодержащего льда 4 м



2007–2008	Бурение в долинах Маллинс и Бикон (США)	Окрестности Мак-Мердо, долин Маллинс и Бикон (Антарктида)	Буровая установка Kosi Drill (модернизированная версия бура Kosi)	Трехрезцовая коронка для бурения льда (102/80)	Керн мореносодержащего льда 10,25 м
				Crushed carbide (не указано)	
				TSD (не указано)	
2010–2012	North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) (Дания)	Северо-Запад Гренландии	Колонковый электромеханический снаряд на грузонесущем кабеле NEEM Drill	1. Трехрезцовая коронка для бурения льда (не указано); 2. Трехрезцовая со вставками карбид вольфрама и кобальта (не указано); 3. TSD (не указано)	Керн мореносодержащего льда 1,76 м
2016–2017	Ice Drilling Program (IDP) (США)	Пиритские холмы (г. Элсуорт-Уитмор)	Буровая установка ASIG Drill для геологоразведочного бурения	1. с PDC-вставками (не указано); 2. Импрегнированная алмазная (не указано); 3. Ступенчатая однослойная алмазная с матрицей треугольной формы (не указано)	Керн 8 м, представленный гранитоидами
2018–2019	Бурение в подледниковых горах Гамбурцева (Китай)	Подледниковые горы Гамбурцева (12 км южнее станции Чжуньшань)	Колонковый электромеханический снаряд на грузонесущем кабеле IBED	1. Трехрезцовая коронка для бурения льда (136/105); 2. С PDC-вставками (136/104); 3. Алмазная импрегнированная (60/41);	Керн 0,6 м КП
2019–2020	US Antarctic Program (USAP) (США)	Южная сторона мыса Минна-Блафф (2019/2020 гг.)	Буровая установка RAID для геологоразведочного бурения	1. С твердосплавными резцами (89/56); 2. Коронка с PDC-вставками (56/38); 3. Импрегнированная алмазная коронка (56/38);	Керн 2,2 м КП
2016–2020	Ice Drilling Program (IDP) (США)	Хребет Огайо (сезон 2016/2017 гг.)	Буровая геологоразведочная установка Winkie Drill с подвижным вращателем	1. Трехрезцовая коронка для бурения льда (–/33,5); 2. Коронка с PDC-вставками (–/71,7); 3. Коронка TSD; (–/33,5) 4. Импрегнированная алмазная коронка (–/33,5)	Керн 2,5 м КП
		Долина Онг (сезон 2017/2018 гг.)			Керн мореносодержащего льда 21,81 м
		Гора Мерфи (сезон 2019/2020 гг.)			Керн мореносодержащего льда 3,87 м

### Результаты исследования и их обсуждение

В рассмотренных отечественных и зарубежных проектах колонкового бурения ПГП применялись две технологии:

– бурение скважин геологоразведочными установками с использованием буровых снарядов со съемным керноприемником, адаптированных для проходки скважин в леднике и ПГП;



– бурение скважин колонковыми электро-механическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле.

Бурение выполнялось коронками:

- со стальными резцами;
- резцами из твердого сплава;
- армированными дробленой твердосплавной крошкой;
- с PDC-вставками;
- с режущими элементами TSD;
- однослойными и импрегнированными алмазными коронками.

Диаметры полученного керна изменялись в диапазоне от 33,5 до 114 мм в зависимости от параметров бурового снаряда и типоразмера ПРИ. Наибольшую эффективность при бурении ПГП показали коронки TSD, алмазные однослойные и импрегнированные коронки.

За последние годы число проектов, задачей которых являлся отбор кернового материала КП, залегающих под ледовым куполом, значительно выросло (см. таблицу).

Применение хорошо зарекомендовавших себя технологий бурения геологоразведочными установками с использованием буровых снарядов со съёмным керноприёмником достаточно эффективно, но вызывает определенные сложности из-за значительных массогабаритных характеристик оборудования, затрудняющих его эксплуатацию в условиях континентальной Антарктиды.

Технология бурения скважин колонковыми электро-механическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле нашла широкое применение в условиях Арктики и Антарктики при глубоком бурении ледников, слоя базального льда и КП, в том числе и при реализации отечественных проектов [30, 31]. Однако ее применение при бурении границы контакта ледника с ПГП вызывало ряд осложнений, которые были обусловлены тремя основными факторами:

– недостаточной нагрузкой на ПРИ при бурении твердых горных пород снарядом на грузонесущем кабеле;

– несоответствием используемого вида ПРИ характеру проходимых горных пород;

– неэффективной очисткой призабойной зоны скважины от ледового шлама и талой воды;

Попытки устранить осложнения сводились к:

- увеличению веса бурового снаряда;

– использованию ПРИ, соответствующего свойствам проходимых горных пород;

– изменению направления циркуляции промывочной жидкости и регулированию ее расхода;

– изменению конструкции шламособорных фильтров.

Несмотря на принятые меры, механическая скорость бурения и длина рейса при использовании электро-механических снарядов на грузонесущем кабеле с применением алмазных и армированных PDC-резцами коронок с увеличенной осевой нагрузкой повысилась незначительно. Возникает вопрос – существует ли иной способ бурения горных пород, который позволит выполнить колонковое бурение скважины электро-механическими снарядами на грузонесущем кабеле с осевой нагрузкой на ПРИ, создаваемой только весом бурового снаряда?

Известен возвратно-вращательный способ разрушения горных пород, заключающийся в воздействии знакопеременных нагрузок, создаваемых возвратно-поворотными колебаниями ПРИ, на горную породу. Комплекс научно-исследовательских работ, проведенный научным коллективом под руководством профессора Э.А. Загрина, был направлен на исследование динамических процессов электро-механической системы колонкового набора и был выполнен только на экспериментальном стенде, состоящем из колонковой трубы с алмазной коронкой, торсионного вала, электродвигателя с системой управления и ручной системы подачи колонкового набора на забой. В результате выполненных исследований было пробурено несколько скважин глубиной 10 см в полнотелом кирпиче марки М-150 и получено несколько кернов хорошего качества, что позволило авторам сделать вывод о пригодности возвратно-вращательного способа разрушения горных пород [11, 13]. Однако разработанный способ не был апробирован в условиях, приближенных к скважинным, поскольку не имел конструктивных узлов присущих буровым снарядам на грузонесущем кабеле: кабельного замка; электроотсека; направляющего устройства (центратора); насоса; механической секции с системой упругих элементов, шламособорных фильтров.

Динамически уравновешенный буровой снаряд, реализующий ВВД ПРИ, планирова-



лось применить для отбора проб донных рыхлых отложений подледникового озера Восток. Однако на сегодняшний день буровой снаряд, использующий принцип ВВД ПРИ, не разработан, а технология бурения льда и горных пород не изучена.

Авторами статьи предполагается, что технология колонкового бурения скважин в донных отложениях динамическим уравновешенным буровым снарядом на грузонесущем кабеле применима при бурении ПГП и может иметь ряд преимуществ перед технологиями, рассмотренными выше. К таким преимуществам можно отнести:

- возможность бурения скважин в твердых горных породах под нагрузкой, значение которой меньше/равно весу бурового снаряда, подвешенного в скважине на грузонесущем кабеле;

- возможность бурения слоя базального льда, слагаемого обломками ПГП различной твердости, стенки которого могут быть недостаточного прочны;

- снижение воздействия реактивного момента на стенки скважины.

Для подтверждения вышесказанных предположений авторами статьи планируется проведение экспериментальных исследований, результаты которых позволят получить:

- зависимости механической скорости бурения горных пород возвратно-вращательным способом от режимных параметров;

- рекомендации по выбору режимных параметров бурения в зависимости от геометрических параметров ПРИ и физико-механических свойств горных пород;

- обоснование теоретической модели разрушения горных пород ВВД ПРИ.

### Заключение

Обзор отечественных и зарубежных проектов колонкового бурения ПГП позволил определить (выявить) актуальное направление исследований в области техники и технологии колонкового бурения скважин с отбором керна на антарктическом континенте.

Хорошо зарекомендовавшие себя технологии колонкового бурения скважин в ПГП в рассмотренных выше проектах имеют ряд недостатков, не позволяющих применить их для бурения скважин в ПГП. В связи с этим возникает необходимость в разработке технологии колонкового бурения ПГП, которая будет обладать низкими массогабаритными характеристиками и возможностью бурить твердые горные породы при малых значениях осевой нагрузки на буровую коронку с минимальным реактивным моментом на корпус бурового снаряда в условиях низкой прочности горных пород, слагающих стенки скважины.

Предполагается, что указанных недостатков лишена технология колонкового бурения ПГП, основанная на разрушении горных пород ВВД ПРИ. Для подтверждения эффективности разрабатываемой технологии и технических средств ее реализации необходимо провести научно-исследовательские работы на экспериментальном стенде, который создается в настоящее время в лаборатории «Технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток» научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

### Список источников

1. Михальский Е.В., Каменев Е.Н., Михальская А.С. Геологическое изучение Антарктиды: исторические аспекты и современное состояние // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2. С. 97–112. EDN: NYHDPH.
2. Wu G., Ferraccioli F., Zhou W., Yuan Y., Gao J., Tian G. Tectonic implications for the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica, from airborne gravity and magnetic data // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 306. <https://doi.org/10.3390/rs15020306>.
3. Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.
4. Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Липенков В.Я. Результаты бурения скважины 5Г на российской станции «Восток» и исследования кернов льда // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 161–171. EDN: VXLDMJ.
5. Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н., Игнатъев С.А., Кадочников В.Г., Крикун Н.С. [и др.]. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724–741. EDN: WQNJET.
6. Игнатъев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В., Васильева М.А., Ожигин А.Ю. Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 141–152. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010076>. EDN: MABFEO.



7. Большунов А.В., Васильев Д.А., Игнатьев С.А., Дмитриев А.Н., Васильев Н.И. Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом // *Лед и Снег*. 2022. Т. 62. № 1. С. 35–46. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010114>. EDN: GOFZCL.
8. Сербин Д.В., Дмитриев А.Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // *Записки Горного института*. 2022. Т. 257. С. 833–842. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82>. EDN: PLQDJW.
9. Сербин Д.В., Кадочников В.Г., Большунов А.В., Дмитриев А.Н., Горелик В.Г. Экспериментальные исследования процесса образования призабойной кольцевой циркуляции теплоносителя // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2024. № 1. С. 16–22. EDN: XZVQNT.
10. Лейченков Г.Л., Попков А.М. Прогнозный осадочный разрез подледникового озера Восток // *Лед и снег*. 2012. Т. 52. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-21-30>. EDN: PKEFDH.
11. Васильев Н.И., Лейченков Г.Л., Загривный Э.А. Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток // *Записки Горного института*. 2017. Т. 224. С. 199–208. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>. EDN: YLMZAH.
12. Шишкин Е.В., Большунов А.В., Тимофеев И.П., Авдеев А.М., Ракитин И.В. Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // *Записки Горного института*. 2022. Т. 257. С. 853–864. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53>. EDN: UMV LXQ.
13. Загривный Э.А., Поддубный Д.А. Динамически уравновешенный буровой снаряд на грузонесущем кабеле для взятия донных отложений подледниковых озёр в Антарктиде // *Проблема механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2018 г.)*. Улан-Удэ, 2018. Т. 1. С. 197–201. EDN: YQRMJN.
14. Hansen L.B. Deep core drilling in ice and core analysis at Camp Century, Greenland, 1961–1966 // *Antarctic Journal of the United States*. 1966. Vol. 1. Iss. 5. P. 207–208.
15. Fountain J., Ussekman T.M., Wooden J., Langway C.C.J. Evidence of the bedrock beneath the Greenland ice sheet near camp century Greenland // *Journal of Glaciology*. 1981. Vol. 27. Iss. 95. P. 193–197.
16. Ueda H.T. Byrd station drilling 1966–69 // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 24–27. <https://doi.org/10.3189/172756407786857631>.
17. Green J., Koci B., Kyne J. Koci drill for drilling ice, sand and rock: drill requirements, design, performance and difficulties // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 105–108. <https://doi.org/10.3189/172756407786857677>.
18. Christa A.J., Biermana P.R., Schaeferd J.M., Dahl-Jensene D., Steffensene J.P., Corbetta L.B., et al. A multimillion-year-old-record of Greenland vegetation and glacial history preserved in sediment beneath 1.4 km of ice at Camp Century // *PNAS*. 2021. Vol. 118. Iss. 13. № 2021442118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021442118>.
19. Rasmussen S.O., Abbott P.M., Blunier T., Bourne A.J., Brook E., Buchardt S., et al. A first chronology for the North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) ice core // *Climate of the Past*. 2013. Vol. 9. Iss. 6. P. 2713–2730. <https://doi.org/10.5194/cp-9-2713-2013>.
20. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Drilling into debris-rich ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole // *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 199–206. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A029>.
21. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland // *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 53–64. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A042>.
22. Kuhl T., Gibson C., Johnson J., Boeckmann G., Moravec E., Slaqny K. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 53–56. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.59>.
23. Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part I: General concept and drilling shelter structure // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>.
24. Talalay P., Li X., Zhang N., Fan X., Sun Y., Cao P., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part II: Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED) // *Annals of Glaciology*. 2021. Vol. 62. Iss. 84. P. 12–22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>.
25. Fan X., Talalay P., Sun Yo., Li X., Zhang N., Markov A., et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part III. Drilling auxiliaries and environment measures // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 24–33. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.39>.
26. Goodge J.W., Severinghaus J.P., Johnson J., Tosi D., Bay R. Deep ice drilling, bedrock coring and dust logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2021. Vol. 62. Iss. 85–86. P. 324–339. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13>.
27. Boeckmann G.V., Gibson C.J., Kuhl T.W., Moravec E., Johnson J.A., Meulemans Z., et al. Adaptation of the Winkie Drill for Subglacial bedrock sampling // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 109–117. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.73>.
28. Rix J., Mulvaney R., Hong J., Ashurst D. Development of the British Antarctic Survey Rapid Access Isotope Drill // *Journal of Glaciology*. 2019. Vol. 65. Iss. 250. P. 288–298. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.9>.
29. Большианов Д.Ю., Клементьев О.Л., Коротков И.М., Николаев В.И. Исследования керна мореносодержащего льда ледника Вавилова на Северной Земле // *Материалы гляциологических исследований*. 1990. № 70. С. 105–110.
30. Litvinenko V.S. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Antarctic natural resource development // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125652. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>.
31. Литвиненко В.С. Уникальные техника и технология бурения скважин во льдах Антарктиды // *Записки Горного института*. 2014. Т. 210. С. 5–10. EDN: TGNKO.



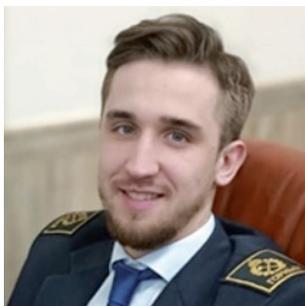
## References

1. Mihalskii E.V., Kamenev E.N., Mihalskaya A.S. Geological study of Antarctica: historical aspects and current state. *Arctic and Antarctic Research*. 2011;2:97-112. (In Russ.). EDN: NYHDPH.
2. Wu G., Ferraccioli F., Zhou W., Yuan Y., Gao J., Tian G. Tectonic implications for the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica, from airborne gravity and magnetic data. *Remote Sensing*. 2023;15(2):306. <https://doi.org/10.3390/rs15020306>.
3. Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Geochemistry*. 2020;80(3):125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.
4. Vasilev N.I., Dmitriev A.N., Lipenkov V.Y. Results of the 5G borehole drilling at Russian Antarctic station "Vostok" and researches of ice cores. *Journal of Mining Institute*. 2016;218:161-171. (In Russ.). EDN: VXLDMJ.
5. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Dmitriev A.N., Ignatev S.A., Kadochnikov V.G., Krikun N.S., et al. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:724-741. (In Russ.). EDN: WQNJET.
6. Ignatiev S.A., Vasilev D.A., Bolshunov A.V., Vasileva M.A., Ozhigin A.Yu. Experimental research of ice cuttings transport by air while drilling of the snow-firm layer. *Ice and Snow*. 2023;63(1):141-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673423010076>. EDN: MABFEO.
7. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Ignatiev S.A., Dmitriev A.N., Vasilev N.I. Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. *Ice and Snow*. 2022;62(1):35-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673422010114>. EDN: GOFZCL.
8. Serbin D.V., Dmitriev A.N. Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:833-842. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82>. EDN: PLQDJW.
9. Serbin D.V., Bolshunov A.V., Dmitriev A.N., Kadochnikov V.G., Gorelikov V.G. Experimental studies of the process of bottomhole annular coolant circulation formation. *Onshore and Offshore Oil and Gas Well Construction*. 2024;1:16-22. (In Russ.). EDN: XZVQNT.
10. Leychenkov G.I., Popkov A.M. Predictive sedimentary section of subglacial Lake Vostok. *Ice and Snow*. 2012;52(4):21-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-21-30>. EDN: PKEFDH.
11. Vasiliev N.I., Leichenkov G.L., Zagrivnyi E.A. Prospects of obtaining samples of bottom sediments from subglacial Lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2017;224:199-208. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>. EDN: YLMZAH.
12. Shishkin E.V., Bolshunov A.V., Timofeev I.P., Avdeev A.M., Rakitin I.V. Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial Lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:853-864. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53>. EDN: UMLXQ.
13. Zagrivny E.A., Poddubny D.A. Dynamically balanced drilling machine for a load-carrying cable for taking bottom sediments of subglacial lakes in Antarctica. In: *Problema mekhaniki sovremennykh mashin: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. = The problem of modern machinery mechanics: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International scientific conference*. 25–30 June 2018, Ulan-Ude. Ulan-Ude; 2018, vol. 1, p. 197-201. (In Russ.). EDN: YQRMJN.
14. Hansen L.B. Deep core drilling in ice and core analysis at Camp Century, Greenland, 1961–1966. *Antarctic Journal of the United States*. 1966;1(5):207-208.
15. Fountain J., Ussekman T.M., Wooden J., Langway C.C.J. Evidence of the bedrock beneath the Greenland ice sheet near camp century Greenland. *Journal of Glaciology*. 1981;27(95):193-197.
16. Ueda H.T. Byrd station drilling 1966–69. *Annals of Glaciology*. 2007;47:24-27. <https://doi.org/10.3189/172756407786857631>.
17. Green J., Koci B., Kyne J. Koci drill for drilling ice, sand and rock: drill requirements, design, performance and difficulties. *Annals of Glaciology*. 2007;47:105-108. <https://doi.org/10.3189/172756407786857677>.
18. Christa A.J., Biermana P.R., Schaeferd J.M., Dahl-Jensene D., Steffensene J.P., Corbetta L.B., et al. A multimillion-year-old-record of Greenland vegetation and glacial history preserved in sediment beneath 1.4 km of ice at Camp Century. *PNAS*. 2021;118(13):2021442118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021442118>.
19. Rasmussen S.O., Abbott P.M., Blunier T., Bourne A.J., Brook E., Buchardt S., et al. A first chronology for the North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) ice core. *Climate of the Past*. 2013;9(6):2713-2730. <https://doi.org/10.5194/cp-9-2713-2013>.
20. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Drilling into debris-rich ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole. *Annals of Glaciology*. 2014;55(68):199-206. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A029>.
21. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland. *Annals of Glaciology*. 2014;55(68):53-64. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A042>.
22. Kuhl T., Gibson C., Johnson J., Boeckmann G., Moravec E., Slaqny K. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):53-56. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.59>.
23. Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part I: General concept and drilling shelter structure. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):1-11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>.
24. Talalay P., Li X., Zhang N., Fan X., Sun Y., Cao P., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part II: Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED). *Annals of Glaciology*. 2021;62(84):12-22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>.



25. Fan X., Talalay P., Sun Yo., Li X., Zhang N., Markov A., et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part III. Drilling auxiliaries and environment measures. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):24-33. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.39>.
26. Goodge J.W., Severinghaus J.P., Johnson J., Tosi D., Bay R. Deep ice drilling, bedrock coring and dust logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2021;62(85-86):324-339. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13>.
27. Boeckmann G.V., Gibson C.J., Kuhl T.W., Moravec E., Johnson J.A., Meulemans Z., et al. Adaptation of the Winkie Drill for Subglacial bedrock sampling. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):109-117. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.73>.
28. Rix J., Mulvaney R., Hong J., Ashurst D. Development of the British Antarctic Survey Rapid Access Isotope Drill. *Journal of Glaciology*. 2019;65(250):288-298. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.9>.
29. Bolshiyonov D.Yu., Klementiev O.L., Korotkov I.M., Nikolaev V.I. Studying the core of the Vavilov glacier moraine-containing ice on the Northern Earth. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 1990;70:105-110. (In Russ).
30. Litvinenko V.S. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Antarctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020;80(3):125652. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>.
31. Litvinenko V.S. Unique technique and technology of drilling wells in Antarctic ice. *Journal of Mining Institute*. 2014;210:5-10. (In Russ.). EDN: TGNKO.

### Информация об авторах / Information about the authors



#### Шадрин Вячеслав Сергеевич,

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

#### Vyacheslav S. Shadrin,

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



#### Климов Владимир Яковлевич,

кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник Лаборатории  
технологии и техники бурения  
скважин в условиях станции Восток,  
Научный центр «Арктика»,  
Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
Klimov\_VYa@pers.spmi.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-9023-9397>

#### Vladimir Ya. Klimov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Senior Researcher of the Laboratory of Technology  
and Drilling Equipment in Vostok Station Conditions,  
Arktika Research Center,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,  
St. Petersburg, Russia,  
Klimov\_VYa@pers.spmi.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-9023-9397>



#### Большунов Алексей Викторович,

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



**Alexey V. Bolshunov,**

Cand. Sci. (Eng.),

Head of the Laboratory of Technology  
and Drilling Equipment in Vostok Station Conditions,  
Arktika Research Center,

Associate Professor,

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,  
St. Petersburg, Russia,

Bolshunov\_AV@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3879-7380>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

В.С. Шадрин – написание текста статьи и выполнение исследований.

В.Я. Климов – разработка методологии работы и написание текста статьи.

А.В. Большунов – разработка концепции статьи.

Vyacheslav S. Shadrin performed the research and wrote the text of the article.

Vladimir Ya. Klimov developed the article methodology and wrote the text of the article.

Aleksey V. Bolshunov developed the concept of the article.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов 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 11.07.2024; одобрена после рецензирования 20.09.2024; принята к публикации 24.09.2024.

The article was submitted 11.07.2024; approved after reviewing 20.09.2024; accepted for publication 24.09.2024.



## Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим специальностям:

- 1.6.9. Геофизика (технические науки);
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки);
- 2.8.1. Технология и техника геолого-разведочных работ (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию;

акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;

- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG/JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

*Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!*

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu). Шрифт – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. В журнал принимаются статьи трех типов:

**Научная статья.** Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной области. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов.

**Обзорная статья.** Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов.



*Краткое сообщение.* Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском/китайском/монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и/или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение».

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Если на рисунке имеются условные обозначения, они должны быть пронумерованы, а их расшифровку стоит выносить в экспликацию к рисунку. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат



PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG/JPEG (сохранение в формате PNG/JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.

Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперiodических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

### **Внимание! Публикация статей является бесплатной.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.*

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

Главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: sarhin@geo.istu.edu.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте [www.nznj.ru](http://www.nznj.ru) или по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu); тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. И-026.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

## Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Е.М. Курчевская<sup>а</sup>, М.В. Яхно<sup>б✉</sup>, А.Е. Сенченко<sup>с</sup>

<sup>а,с</sup>НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», Иркутск, Россия

<sup>б</sup>Иркутский 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-серицитово-формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

**Ключевые слова:** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

**Финансирование:**

**Благодарности:**

## Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya<sup>а</sup>, Marina V. Yakhno<sup>б✉</sup>, Arkady Y. Senchenko<sup>с</sup>

<sup>а,с</sup>NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

<sup>б</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract. Purpose.** The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.



Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

**Keywords:** Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

**Funding:**

**Acknowledgements:**

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

#### Информация об авторах / Information about the authors

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Курчевская Елена Михайловна,**  
старший научный сотрудник,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Россия,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru  
ORCID

**Elena M. Kurchevskaya,**  
Senior Researcher,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russia,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru  
ORCID

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Яхно Марина Владиславовна,**  
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ ymar@istu.edu  
ORCID

**Marina V. Yakhno,**  
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ ymar@istu.edu  
ORCID

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Сенченко Аркадий Евгеньевич,**  
генеральный директор,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Россия,  
senchenko@tomsgroup.ru  
ORCID

**Arkady E. Senchenko,**  
CEO,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russia,  
senchenko@tomsgroup.ru  
ORCID

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

**Том 47 № 3 (88) 2024**

Дизайнер А.А. Хохряков  
Редактор Е.В. Шешуков  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.09.2024 г. Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,5.  
Тираж 500 экз. Зак. 59. Поз. плана 4н

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

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

