0+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC, TECHNOLOGICAL AND PRODUCTION JOURNAL

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 26, № 5, СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ 2026 г.
Vol. 26, No 5, SEPTEMBER – OCTOBER 2026

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

www.n-gn.ru

ЭВОБЛАСТ®
ДВИЖЕМ ЭВОЛЮЦИЮ
ГОРНЫХ РАБОТ



ЭВОБЛАСТ®

ДВИЖЕМ ЭВОЛЮЦИЮ ГОРНЫХ РАБОТ

Группа компаний «ЭВОБЛАСТ» — российский разработчик, изготовитель и поставщик передовых взрывчатых материалов промышленного назначения, а также современных и эффективных экспертных решений для горной и строительной отраслей промышленности.

Значительный опыт реализации проектов в России — компания представлена на рынке с 1993 года.

- **Производство и поставка инновационных эмульсионных взрывчатых веществ для заряжания восстающих скважин на подземных горных работах;**
- **Производство и поставка эмульсионных взрывчатых веществ для открытых горных работ;**
- **Разработка экспертных решений и оказание услуг премиального сервиса по ведению буровзрывных работ;**
- **Проведение комплексных аудитов буровзрывных работ с повышением эффективности и безопасности;**
- **Обучение эффективным практикам ведения буровзрывных работ.**

0+

ГК «ЭВОБЛАСТ»
125315, Россия, Москва,
Ленинградский пр-т., д. 72, к. 1, 8 этаж
тел.: +7 495 641 11 64
e: marketing@evoblast.ru
w: evoblast.ru

НОВИНКА!

СТАЛКЕР 15-34, 80-34

КОМПЛЕКСЫ ТРАССОПОИСКОВЫЕ

Поиск и диагностика подземных коммуникаций: высокая точность и функциональность.



ПРИЕМНИК ПТ-34:

Интеллектуальная компенсация бокового смещения – новый уровень точности определения глубины даже в стороне от трассы.



- Встроенный GPS-/ГЛОНАСС-модуль: автоматическая геопривязка для интеграции в ГИС;
- высокоточное позиционирование (до 1 см) совместно с RTK-планшетом PrinCe LT700H;
- использование смартфона вместо внешнего GPS-трекера;
- диапазон рабочих температур: от –30 до +50 °С;
- время работы – до 20 часов.

Новые частоты:

- активный режим: 83 и 200 кГц;
- пассивный режим: 9–100 кГц («Радио-2»).

ГЕНЕРАТОР ГТ-15:



- вес – 3,5 кг;
- мощность и ток – до 15 Вт, 0,8 А;
- частоты генератора: 273, 526, 1024, 8928 Гц, 33 и 83 кГц;
- увеличенное время автономной работы от литий-железо-фосфатного аккумулятора – 6 ч;
- индикация величины напряжения и выходного тока для оценки качества подключения к линии;
- встроенный индуктор обеспечивает наведение сигнала 33 и 83 кГц;
- бесконтактная подача поискового сигнала при помощи передающих клещей КИ-50 и КИ-100 от 1 до 33 кГц;
- увеличенная ниша для хранения аксессуаров.

ГЕНЕРАТОР ГТ-80:



- вес – 5,9 кг;
- мощность и ток – до 80 Вт, 12 А;
- частоты генератора: 273, 526, 1024, 8928 Гц, 33 кГц;
- увеличенное время автономной работы от литий-железо-фосфатного аккумулятора – 4 ч;
- работа с приемниками других производителей от 300 до 10000 Гц;
- дистанционное управление генератором через сеть GSM;
- отложенный старт;
- встроенный индуктор обеспечивает наведение сигнала 33 кГц;
- бесконтактная подача поискового сигнала при помощи передающих клещей КИ-50 или КИ-100 от 1 до 33 кГц.

0+

СДЕЛАНО В РОССИИ

РАДИО-СЕРВИС

426000, г. Ижевск, а/я 10047, ул. Пушкинская, 268, тел.: (3412)43-91-44,
факс: (3412) 43-92-63, e-mail:office@radio-service.ru, www.radio-service.ru

На правах рекламы

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Научно-технический и производственный журнал



Т. 26, № 5

СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ 2026 г.

Журнал издается с 2001 года

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ и горные науки

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА
Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Недропользование и горные науки»

РЕДАКЦИЯ:
Заместитель главного редактора **В. Н. Хетагуров**
Ведущий редактор **Н. А. Федотенко**
Ученый секретарь **Н. А. Милетенко**
Помощник главного редактора **Б. Н. Пашичев**

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ:
117647, ул. Академика Капицы, д. 26, 1.
Тел.: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru http: //www.n-gn.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер ПИ № ФС 77-83630 от 26.07.2022 г.

По решению ВАК журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по разработке месторождений полезных ископаемых и по наукам о Земле

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ и в Российский индекс научного цитирования. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Подписной индекс издания в каталоге «Урал-Пресс», в объединенном каталоге АРЗИ «Пресса России» – **88016**
В течение года можно произвести подписку на журнал непосредственно в редакции

За точность приведенных сведений и содержание данных, не подлежащих открытой публикации, несут ответственность авторы

При перепечатке ссылка на журнал «Маркшейдерия и недропользование» обязательна

Журнал отпечатан в типографии ООО «Клуб печати»
127018, Москва, 3-ий проезд Марьиной Рощи, д. 40, стр. 1
тел.: +7(929)982-72-82

Тираж 1000 экз.

Свободная цена.

Дата выхода в свет: 05.11.2026

ISSN 2079-3332
9 772079 333778
24 003

© ООО «Издательский дом «Недропользование и горные науки», 2026

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ю. В. Дмитрак – д.т.н., проф., зав. отделом «Моделирование и управление горнотехническими системами», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. А. Барях - академик РАН, д.т.н., проф., руководитель научного направления «Горные науки» центра, ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь, РФ

В. И. Голик - д.т.н., проф., проф. кафедры «Горное дело», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», г. Владикавказ, РФ

В. В. Грицков – вице-президент ООО «Союз маркшейдеров России», г. Москва, РФ

В. Н. Захаров - академик РАН, д.т.н., проф., директор, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Н. М. Качурин - д.т.н., проф., зав. кафедрой «Геотехнологии и строительство подземных сооружений», ТулГУ, г. Тула, РФ

Р. В. Клюев - д.т.н., проф., зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», г. Владикавказ, РФ

Н. В. Милетенко - д.г.-м.н., проф., ученый секретарь Научно-технического совета, Минприроды РФ, г. Москва, РФ

И. А. Пыталев – д.т.н., проф., директор Института горного дела и транспорта, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, РФ

К. Н. Трубецкой – академик РАН, д.т.н., проф., советник президиума РАН, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

М. А. Тюленев – к.т.н., доц., зав. кафедрой «Открытые горные работы», КузГТУ, г. Кемерово, РФ

В. А. Чантурия - академик РАН, д.т.н., проф., научный руководитель отдела «Проблемы комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДКОЛЛЕГИЯ

С. Б. Вуйич – проф., доктор наук, действительный член Академии инженерных наук Сербии, г. Белград, Сербия

И. Гобани – д.т.н., проф. химии материалов и биогидрометаллургии, Факультет естественных наук, Колледж здравоохранения и естественных наук, Линкольнский университет, Великобритания

К. Дребенштедт – проф., доктор наук, кафедра «Открытые горные работы», Технический университет Горной академии Фрайберга, Германия

Ю. Д. Каплунов – проф., д.физ.-мат.н., Школа компьютерных наук и математики, Кильский университет, г. Ньюкасл-андер-Лайм, Великобритания

А. А. Осокин - доктор наук, Инженер-геотехник, рудник «Золотая роща», 29Metals, Западная Австралия

Н. Б. Рыспанов – д.т.н., Президент Национальной Академии Горных Наук Казахстана, Президент Горнопромышленного союза Казахстана, Казахстан

Л. Хуанг – проф., доктор наук, Китайский университет горного дела и технологий, Председатель Международного общества маркшейдеров, Китай

В. Т. Хунг – проф., доктор наук, строительный факультет, кафедра «Подземного и шахтного строительства», Ханойский горно-геологический университет, Вьетнам

М. Цехлар – д.т.н, проф., декан, факультет горного дела, экологии, управления технологическими процессами и геотехнологий, Технический университет Кошице, Словакия

И. К. Чунуев – к.т.н., Президент Кыргызской горной ассоциации и маркшейдерии, член Правления Евразийского Общества Экспертов Недропользователей, КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

Б. Эрбаш – проф., доктор наук, кафедра математики, Эскишехирский технический университет, Турция

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

И. И. Айнбиндер - д.т.н., проф., г.н.с., отдел «Теория проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

А. А. Добрынин - к.т.н., в.н.с., отдел «Проблемы геомеханики и разрушения горных пород», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Г. В. Калабин - д.т.н., проф., г.н.с., отдел «Горная экология», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

С. Б. Кулибаба – д.т.н., проф., в.н.с., лаборатория «Многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Ф. К. Низаметдинов - д.т.н., проф., зав. кафедрой «Маркшейдерское дело и геодезия», КарТУ имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

М. Б. Носырев – д.т.н., проф., кафедра «Информатики», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, РФ

В. Н. Одинцев – д.т.н., в.н.с., центр проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

А. А. Хорешок – д.т.н., проф., научный руководитель Горного института, КузГТУ, г. Кемерово, РФ

Ю. Ян – доц., Школа наук об окружающей среде и пространственной информатики, Китайский горно-технологический университет, г. Сюйчжоу, Китай

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Scientific, Technological and Production Journal



Vol. 26, No 5

SEPTEMBER – OCTOBER 2026

journal has been published since 2001

FOUNDER OF THE JOURNAL
PUBLISHING HOUSE MINERALS MANAGEMENT AND MINING SCIENCES,
LIMITED LIABILITY COMPANY

EDITORIAL OFFICE:
Deputy Editor-in-Chief **V. N. Khetagurov**
Lead Editor **N. A. Fedotenko**
Scientific secretary **N. A. Miletenko**
Assistant Editor-in-Chief **B. N. Pashichev**

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE AND PUBLISHER:

117647, Akademika Kapitsa st., 26, 1.
Phone: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru
http: //www.n-gn.ru

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Registration certificate PI No. FS 77-83630 dated July 26, 2022

By decision of the Higher Attestation Commission, the journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results can be published dissertations for the degree of candidate and doctor of science in the development mineral deposits and geosciences

The journal is included in the Abstract Journal and Databases of VINITI and in the Russian science citation index Information about the journal is published annually in the international reference system in the periodicals and continuing editions of Ulrich's Periodicals Directory

Subscription index of the publication in the Ural-Press catalog, in the unified catalog ARZI «Press of Russia» – **88016**

During the year, you can subscribe to the journal directly in the editorial office

For the accuracy of the information provided and the content of data not subject to open publications are the responsibility of the authors

When reprinting a link to the journal «Mine Surveying and Subsurface Use» required

Printed by LLC «Printing Club»

127018, Moscow
phone: +7(929)982-72-82

Covering - 1000 copies.

Free price.

Release date: 05.11.2026

ISSN 2079-3332

© Publishing House Minerals Management and Mining Sciences, LLC, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

Yuri V. Dmitrak - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Modeling and Management Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Alexander A. Baryakh - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the scientific direction Mining Sciences of the center, Mining Institute, Ural Branch, RAS, Perm, Russian Federation
Vladimir I. Golik - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Mining Department, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation
Victor V. Gritskov - Vice-President of the Union of Surveyors of Russia, Moscow, Russian Federation
Valery N. Zakharov - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Nikolay M. Kachurin – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Geotechnologies and Construction of Underground Structures, Tula State University, Tula, Russian Federation
Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department Power Supply of Industrial Enterprises, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation
Nikolay V. Miletenko - Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Prof., Scientific Secretary of the Scientific and Technical Council, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
Ivan A. Pytalev – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Mining and Transport, Nosov Marnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
Kliment N. Trubetskoy – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Advisor to the Presidium of the RAS, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Maxim A. Tylenev – Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Open-pit Mining, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
Valentin A. Chanturia - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Department of Problems of complex extraction of mineral components from natural and man-made raw materials, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Slobodan B. Vujić - Professor, Dr. Sci., Full member of the Academy of Engineering Sciences of Serbia, Belgrade, Serbia
Yousef Ghorbani – Ph.D., Professor in Materials Chemistry and Bio-Hydrometallurgy, School of Natural Science, College of Health and Science, University of Lincoln, United Kingdom
Carsten Drebenstedt - Professor, Dr. Sci., Chair Surface Mining, Technical University Mining Academy Freiberg, Germany
Julius D. Kaplunov – Professor, Dr. Sci. in Theoretical Solid Mechanics, School of Computer Science and Mathematics, Keele University, United Kingdom
Alexander A. Osokin - Dr. Sci., Geotechnical Engineer, Golden Grove, Operations Pty Ltd, 29Metals, Western Australia
Nurlan B. Ryspanov - Dr. Sci. (Eng.), President of the National Academy of Mining Sciences of Kazakhstan, President of the Kazakhstan Mining Union, Kazakhstan
Leting Huang – Professor, Dr. Sci., China University of Mining and Technology, Chair of the International Society for Mine Surveying, China
Vo Trong Hung - Professor, Dr. Sci., Faculty for Construction, Department for Underground and Mines Construction, Hanoi University of Minnig and Geology, Vietnam
Michal Cehlar - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Dean, Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies, Technical University of Kosice, Slovakia
Ishimbay K. Chunuev – PhD in Technical Sciences, President of the Kyrgyz Mining Association and Surveying, Member of the Board of the Eurasian Society of Experts of Subsoil Users, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyzstan
Baris Erbas – Professor, Dr. Sci., Department of Mathematics, Eskisehir Technical University, Turkey

EDITORIAL COUNCIL

Igor I. Ainbinder - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Alexander A. Dobrynin - Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Geomechanics and Rock Destruction, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Gennady V. Kalabin - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Mountain Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Sergey B. Kulibaba - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher Laboratory of Multiphase processes in rock formations during field development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Farit K. Nizametdinov - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Surveying and Geodesy, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan
Mikhail B. Nosyrev - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Computer Science, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation
Vladimir N. Odintsev - Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher at the Center for Problems of Methane and Gas Dynamic Phenomena of Coal and Ore Deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Alexey A. Khoreshok – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Mining Institute, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
Yongjun Yang - Ass. Professor, School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, China

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ИНТЕРВЬЮ

Взрыв под контролем: разговор о трендах в горной индустрии. Интервью с Дмитрием Сизовым 5

ИТОГИ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ

Итоги Международной конференции «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2026) 9

ЮБИЛЕИ

55 лет Милетенко Наталье Александровне 14

ОБОГАЩЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Е. С. Орынгожин, Р. А. Юсубалиев, Е. Е. Орынгожа, И. М. Малахова
Технология повышения окислительного потенциала регенерированных растворов для подземного выщелачивания урана 16

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

К. Ю. Москаленко
Технологии лазерного сканирования в комплексе маркшейдерского обеспечения открытых горных работ на золоторудном месторождении 22

А. А. Басаргин
Разработка алгоритма моделирования месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем 30

Е. А. Тагаев
Определение параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта 36

М. Г. Выстрчил, М. В. Романов, Л. А. Рамирес-Мелендес
Сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек 43

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ

А. Р. Тухбатулин, Ю. А. Васянович, П. С. Таран
Метод формирования скважинного заряда патронированным эмульсионным взрывчатым веществом в обводненных скважинах на карьерах строительных материалов Приморского края 50

В. Ф. Гутник, А. Н. Анушенков
Проходка горных выработок большого сечения буровзрывным методом в условиях многолетней мерзлоты способом сплошного забоя 56

ЦИФРОВИЗАЦИЯ

В. А. Атрушкевич, С. М. Попов
Современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства 65

INTERVIEW

Controlled Blasting: A Discussion on Trends in the Mining Industry. An Interview with Dmitry Sizov 5

RESULTS OF SCIENTIFIC CONFERENCES

Results of the International Conference "Innovative Processes Complex and deep Processing Natural and Non-Traditional Mineral Raw Materials" (Plaksin readings – 2026) 9

ANNIVERSARIES

Natalya Alexandrovna Miletenko is 55 years old 14

ENRICHMENT AND PROCESSING OF MINERALS

Ye. S. Oryngozhin, R. A. Yusubaliev, Ye. Ye. Oryngozha, I. M. Malakhova
Technology for increasing the oxidation potential of recycled solutions for uranium in-sit leaching 16

MINE SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS

K. Yu. Moskalenko
Laser scanning technologies in the complex of mine surveying support for open-pit mining at a gold deposit 22

A. A. Basargin
Development of an algorithm for modeling mineral deposits based on a spatial Markov chain with a fixed path 30

E. A. Tagaev
Determination of advance sampling grid parameters for coal quality control in a complex-structure seam 36

M. G. Vystrchil, M. V. Romanov, L. A. Ramirez-Melendez
Comparative analysis of the stability of rock mass volume calculation methods under varying point-cloud density 43

GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES

A. R. Tukhbatulin, Yu. A. Vasyanovich, P. S. Taran
Method of forming a borehole charge with cartridged emulsion explosive in flooded boreholes at construction material quarries in Primorsky krai 50

V. F. Gutnik, A. N. Anushenkov
Drilling and blasting of large-section mining workings in permafrost conditions by the solid failing method 56

DIGITALIZATION

V. A. Atrushkevich, S. M. Popov
The current state and prospects of organizing the use of artificial intelligence in mining safety issues 65

ГЕОЭКОЛОГИЯ

В. А. Кудряшов

Плотность потока радона на Анавгайском геотермальном месторождении Камчатского края 74

А. И. Лазовский

Интеграция Фурье-анализа и нейросетевых моделей для оценки гидрометеорологических угроз на территории Северо-Кавказского федерального округа 84

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. В. Гончар, С. В. Корнилков, И. А. Четверкин, В. А. Пикалов

Особенности прогнозирования экологических последствий при проектировании экологически сбалансированной горнотехнической системы 90

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М. В. Андреев, В. П. Петрищев, Г. А. Пономарева

Комплексная методика исследования разломно-блоковой тектоники и ее влияния на нефтегазоносность 98

М. В. Андреев, В. П. Петрищев, Г. А. Пономарева

Геолого-геодинамические условия формирования месторождений углеводородов в Южном Предуралье 105

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ

И. О. Паничкин

Композитная типизация геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы 113

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

И. О. Ковальчук, А. А. Добрынин, Р. А. Рахманов

Увеличение ширины блока в приконтурной зоне карьера при помощи разгрузочных пауз с сохранением безопасного уровня сейсмики 118

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА, ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Е. В. Федоров, С. Б. Кулибаба, Н. А. Милетенко

Особенности метановыделения из отрабатываемого угольного пласта в зоне геологических нарушений 125

И. Н. Горшенков, Б. Н. Пашичев, Е. В. Ульянова

Связь содержания железа и серы с газоносностью и неоднородностью микроструктуры углей 131

GEOECOLOGY

V. A. Kudryashov

Radon flux density at the Anavgay geothermal, Kamchatka Territory 74

A. I. Lazovsky

Integration of Fourier analysis and neural network models for assessing hydrometeorological hazards in the North Caucasus federal district 84

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF MINING SYSTEMS DESIGN

N. V. Gonchar, S. V. Kornilkov, I. A. Chetverkin, V. A. Pikalov

Features of environmental impact forecasting in designing an environmentally sustainable mining system 90

GEOLOGY, EXPLORATION, AND DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS

M. V. Andreev, V. P. Petrishchev, G. A. Ponomareva

Integrated methodology for studying fault-block tectonics and its influence on petroleum potential 98

M. V. Andreev, V. P. Petrishchev, G. A. Ponomareva

Geological and geodynamic conditions for the formation of hydrocarbon deposits in the Southern Pre-Urals 105

MINERAL RESOURCES

I. O. Panichkin

Composite typing of geometric structures of a three-dimensional geochemical field in a porphyry copper system 113

GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS

I. O. Kovalchuk, A. A. Dobrynin, R. A. Rakhmanov

Increasing of a blasted block width in the open pit final-wall zone by using relief pauses with keeping safety vibration 118

MINE AEROGASDYNAMICS, MINING THERMOPHYSICS

E. V. Fedorov, S. B. Kulibaba, N. A. Miletenko

Characteristics of methane emission from a coal seam being mined in zones of geological discontinuities 125

I. N. Gorshenkov, B. N. Pashichev, E. V. Ulyanova

Relationships of iron and sulfur content with gas content and heterogeneity of microstructure of coals 131

ЭВОБЛАСТ®

ДВИЖЕМ ЭВОЛЮЦИЮ
ГОРНЫХ РАБОТ

Группа «ЭВОБЛАСТ» – признанный лидер в сфере передовых разработок для продуктивного ведения буровзрывных работ. В основе работы компании заложены принципы, направленные на ответственное ведение бизнеса, выполнение требований безопасности по отношению к сотрудникам, заказчикам и территориям, на которых внедряются разработки. Герой нашего интервью – Дмитрий Сизов, менеджер по развитию бизнеса Группы «ЭВОБЛАСТ», достоверно знающий, какие факторы влияют на безопасность и эффективность, как качественно продвигать продукты и услуги своей компании.



ВЗРЫВ ПОД КОНТРОЛЕМ:
РАЗГОВОР О ТРЕНДАХ В ГОРНОЙ ИНДУСТРИИ

Интервью с Дмитрием СИЗОВЫМ

Смесительно-зарядные машины для открытых горных работ

■ **Дмитрий, мы рады возможности встречи с вами в рамках нашего интервью, поскольку считаем, что важно рассказывать представителям горнодобывающих предприятий, научной горной общественности, читателям о современных трендах, которые происходят на поле буровзрывных работ как одной из важнейших составляющих освоения недр, и, конечно, о вашей компании, задающей тренды и создающей понимание, что данное направление горных работ находится на достойном уровне в нашей стране, и вы, как представитель компании, точно знаете базовые стратегии данного вида деятельности.**
Каковы, на взгляд менеджера по развитию бизнеса, прикладные механизмы повышения эффективности БВР? В чем состоит комплексный подход к оптимизации взрывных работ?

– Поскольку понимание эффективности взрывных работ и задачи, решаемые взрывниками, могут быть разными от предприятия к предприятию, то и механизмы решения тех или иных задач могут различаться. Например, это может быть повышение эффективности дробления горной породы, снижение потерь при разубоживании, снижение воздействия на законтурный массив, уменьшение разлета горной массы, снижение химического воздействия или ударной волны, оптимизация затрат расходов взрывчатого вещества, снижение выделения вредных газов при массовых взрывах, а порой и сочетание перечисленных показателей одновременно. Так вот, ключевым прикладным механизмом для решения этих взаимосвязанных (а порой взаимоисключающих) параметров как раз и является комплексный подход ко всем звеньям цепочки производства буровзрывных работ и возможность воздействовать на них, опять же, взаимосвязанно и одновременно.

■ **Как давно ваша компания занимается решением вопросов по обеспечению эффективного и безопасного внедрения разработок по ведению БВР?**

– История компании насчитывает более 30 лет. Еще с начала 1990-х мы начали развитие в международном формате и в контуре мирового разработчика и производителя продуктов и технологий для взрывного дела. С 2022 года продолжили самостоятельное развитие и подхватили знамя инноваций в этой сфере, развивая уже суверенные инновационные разработки.

■ **Интересно узнать, кто является заказчиком ваших услуг, продукции – это Россия? Или не только Россия? Обрисуйте географию взаимодействия.**

– Мы сфокусированы на развитии российского рынка. Здесь огромное поле для деятельности, и мы имеем в развитии карт-бланш, потому что горнодобывающая промышленность во времена кризиса является одной из немногих, которая процветает, позволяя тем самым нам развивать технологии повсеместно и внедрять их.

■ **Нам известно о том, что «ЭВОБЛАСТ» активно расширяет образовательное поле для специалистов горных предприятий, заходит в том числе на площадки университетов.**

– Да, профильные университеты, можно сказать, мы используем как источник ценных кадров, молодых кадров. Занимаемся этим довольно давно. Начали мы с севера и северо-запада. Много лет взаимодействуем с Санкт-Петербургским государственным горным университетом имени императрицы Екатерины II. Относительно недавно открыли

учебный класс в Московском геологоразведочном институте имени Серго Орджоникидзе. В ближайших планах у нас аудитория группы Эвобласт в Сибирском федеральном университете. И на этом останавливаться не собираемся, ведь сейчас, мы понимаем, кадры как никогда решают если не все, то очень многое.

Заряжание взрывных скважин

■ **Расскажите о вашем продукте – программном обеспечении «БВР Контроль». В чем его особенность?**

– Это, можно сказать, уникальная – без ложной скромности – собственная разработка. Во всяком случае мы давно в этом бизнесе, но аналогов не знаем. Как у нас, так и за рубежом все это находится, по нашим сведениям, в зачаточном состоянии. Программно-аппаратный комплекс адресован, в данной итерации, горнякам, работающим на открытых горных работах, и уже на стадии полевых испытаний умеет достаточно многое.

Его аппаратная часть устанавливается на планшет, используемый в связке со смесительно-зарядной машиной. Комплекс отслеживает следующие параметры: фактическая длина скважин, объемом заряжаемого скважинного взрывчатого вещества, величины недозаряда, время заряжания.

Комплекс также контролирует параметры загружаемых в скважину компонентов ПВ, главный параметр – объем компонентов. Это обеспечивает стабильность качества получаемого эмульсионного взрывчатого вещества в скважине. Все параметры фиксируются в электронном журнале с доступом всех заинтересованных лиц, что непосредственным образом положительно влияет на качество всего цикла БВР, за счет чего экономические параметры существенно повышаются. Система многообещающая, быстро развивается, прирастая новыми функциями, все это плавно течет в сторону автоматизации, на какой-то стадии даже роботизации (к чему мы как раз и стремимся), что позволит обеспечить снижение доли ручного труда на всех этапах взрывных технологий и процессов по цепочке буровзрывных работ.

■ **Кто потенциальные потребители этой программы?**

– Здесь никаких ограничений нет. Возраст – ноль плюс *(Смеется. – Прим. авт.)*. Предприятия, горные предприятия по добыче полезных ископаемых открытым способом, которым необходимо повысить эффективность ведения работ, контролировать качество БВР, облегчить труд, может быть, даже в какой-то мере справиться с дефицитом сотрудников в поле; тем, кто хочет существенным образом повлиять на экономическую эффективность и безопасность ведения работ на взрывном блоке, – вот всем им адресован этот многообещающий продукт.

■ **Какие технологические решения в последнее время были предложены компанией с целью обеспечения безопасности и эффективности проведения БВР? Что бы выделили как наиболее значимое, важное?**

– Наверное, здесь стоит в первую очередь выделить электронную систему инициирования, ее торговое название «iDet», которая позволяет существенным образом повлиять на безопасность и эффективность взрывания. В отличие от системы инициирования предыдущих поколений, эта система крайне безопасна в том смысле, что она до последнего момента инициирования взрывания позволяет тестировать смонтированную взрывную сеть, что практически сводит вероятность отказов на взрывном блоке к нулю. Помимо этого, несравнимо выше точность срабатывания замедлений, что также позволяет решить проблему уже в области качества взрывания. Это и качество дробления, и параметры выброса взорванной горной массы, и разрушение законтурного массива, и снижение сейсмического воздействия и взрывной волны, и разлета горной массы при взрыве. То есть эта система великолепна практически всем. Действительно новое слово направления БВР, за которое мы ратуем, продвигаем. И нет еще ни одного предприятия, которое после знакомства с этой системой вернулось бы на системы предыдущего поколения.

Мы, конечно, с такой системой на рынке не одни. Но именно эта система благодаря тому, что она создана по нашему техническому заданию и прошла многократные тесты и отбор качество всех комплектующих, надежна. Гарантируем ее превосходное качество в плане надежности, защиты от влаги и работоспособности при отрицательных температурах. Она прекрасно справляется с глубокими минусами: провода не ломаются, детонаторы не разбираются. Вся аппаратура для программирования и инициирования прекрасно держит морозы до минус 55. Это неоднократно проверено нами. Что важно, мы не просто являемся распространителями и владельцами этой торговой марки, но и как компания представляем услуги внедрения и взрывания сами.

Так вот, уже пару лет как нашим руководством было принято стратегическое решение о переводе всех работ (взрывных работ внутри нашей компании, когда мы представляем услуги взрывания) на электронную систему инициирования, и это неспроста. То есть мы сами применяем эту систему для безопасности и эффективности и настоятельно рекомендуем делать это нашим заказчикам.



Заряжание взрывных скважин



Регистрирующее и пусковое устройства iDet - электронные системы инициирования®



ЭСИ iDet®

■ **Скажите, пожалуйста, сталкивались ли ваши специалисты с решением каких-то нестандартных задач при выполнении БВР или все и всегда идет по запланированным траекториям?**

– Да, безусловно, задачи со звездочкой порой бывают. Это, в общем, как раз одно из наших преимуществ как компании с огромным опытом – решать нетривиальные задачи.

Могу припомнить, не называя заказчика по понятным причинам, поскольку, да, мы часто подписываем соглашение о конфиденциальности и связаны обязательствами. Были ситуации, можно сказать, уникальные, когда заказчик от безысходности, оттого, что ни сам не мог решить проблему, ни ряд подрядчиков, приходил к нам с просьбой: «Пожалуйста, сделайте что-нибудь, чтобы уменьшить разлет породы». У карьера буквально в 100 метрах от границы землеотвода проходит федеральная трасса, совсем рядом расположена заправочная станция. При взрыве, естественно, куски породы долетали до этой заправки. Дистанция для взрыва (около 100 метров) – крайне маленькая. Наши специалисты пришли и, внедрив комплекс мер, решили проблему разлета. Этот карьер ныне прекрасно работает и пользуется нашими услугами.

Другой пример приведу о подземных горных работах. Приоткрою завесу тайны: это в Москве было, когда зака

■ **Какую из выполненных вашей организацией задач могли бы определить как прорывную и знаковую в работе?**

– Отвечая на вопрос, имеет смысл не выделять какое-то конкретное решение, а вернуться к упоминанию нашего комплексного подхода. Относительно недавно в горной индустрии стал трендом подход Blast to Mine (взрыв для экскавации), являющийся наиболее эффективным. Его смысл заключается в том, чтобы воздействовать комплексно на все звенья цепочки ведения буровзрывных работ. Эта цепочка начинается с производства взрывчатых материалов, подбора средств инициирования, проектирования паспорта взрывания, контроля стабильности качества ВВ и далее продолжается уже на взрывном блоке, когда необходимо обеспечить культуру монтажных работ, монтажа взрывной сети, правильного подбора конструкции заряда скважины, обеспечить качество операций забойки скважин. В процессе взрывания необходимо проконтролировать смещение контуров рудных тел, если мы говорим о добыче рудных полезных ископаемых. Получив эти данные, можно оперативно откорректировать какие-то параметры в зависимости от того, какая фрагментация получится при экскавации в развале взорванной горной массы. И вот такой комплексный подход ко всем перечисленным звеньям этой цепочки может дать хороший кумулятивный экономический эффект и, не в последнюю очередь, будет эффективен в плане безопасности.

■ **Мы знаем, что у вашей компании развитая инфраструктура и собственные производственные мощности, расположенные по всей России. Скажите, планируете ли вы расширять географию и усиливать производственные мощности в перспективе или они достаточны?**

– Исторически так сложилось, что наша инфраструктура начала расти с северо-запада, Кольского полуострова, и поступательно в течение более чем 30 лет развивалась в восточном направлении. Сейчас мы работаем и на Чукотке, и в Белгородской области, то есть география впечатляет. Но мы по-прежнему считаем: этого недостаточно, потому что Родина широка и бескрайна. Логистические плечи просто гигантские, и мы, конечно, постоянно работаем над тем, чтобы развить и расширить сеть складов производственных мощностей. Ко-



Шашка-детонатор ЭВОПРАЙМ®

нечно, это связано с трудностями, поскольку работаем хоть и гражданскими, но взрывчатыми веществами, взрывчатыми материалами. Данный факт накладывает особую ответственность, и мы, понимая эту ответственность, делаем все осознанно, не спеша с соблюдений всех правил безопасности.

■ Дмитрий, хотелось бы также узнать о недавно представленном вами для горной общественности докладе об использовании искусственного интеллекта в анализе фрагментации в режиме реального времени по мере экскавации. В чем суть подхода?

– Это система, позволяющая в режиме онлайн контролировать гранулометрический состав уже взорванной горной массы в развале. Аппаратная часть в данном случае монтируется на экскаваторе довольно высоко: на верхней деке. Это помогает избежать проблем запыленности, потому что используется стереокамера, а ее объектив должен быть всегда чистым. В краткосрочной перспективе у нас переход на стереокамеру более высокого разрешения, что позволит повысить качество распознавания гранулометрического состава в значительно лучшем качестве и при более низкой освещенности, осадках, будь то снег, будь то дождь. В чем соль этой системы? Она в автоматическом режиме с помощью машинного зрения и искусственного интеллекта оперативно распознает гранулометрический состав взорванной горной массы, и это позволяет оперативно дать обратную связь инженерам для корректировки параметров проекта взрывания.

Мы благодаря анализу данных можем проконтролировать процессы бурения, корректировать, например, сетку бурения скважин, конструкцию заряда в скважине, корректировать параметры самого взрывчатого вещества, например систему замедлений, когда мы говорим о системе инициирования. То есть это полезный инструмент для оперативной обратной связи с целью повышения качества взрывания. И все это онлайн, не постфактум, не в какие-то журналы, которые идут в архивы, а инструмент оперативного реагирования.

■ Какой вам видится перспектива развития буровзрывных работ в нашей стране и мире?

– Думаю, здесь я не раскрою никаких секретов. Тенденции очевидны – это решение прикладных задач. Сейчас большие проблемы с человеческим ресурсом, поэтому тренд – на дальнейшую автоматизацию и дальнейшее обезлюживание всех звеньев цепочки технологии. Мы неизбежно идем в сторону роботизации. Это, конечно же, благо, потому что помимо решения прикладной задачи с человеческими ресурсами, этим самым улучшаются параметры экономики процесса и далеко не в последнюю очередь вопросы безопасности для человека, находящегося непосредственно на взрывном блоке.

■ Вы упоминали про значимость привлечения специалистов, в том числе молодых специалистов, в вашу область деятельности и в то же время ратуете за необходимость обезлюживания пространства, где ведутся буровзрывные работы. А как относитесь к наметившемуся сейчас тренду привлечения женщин в горное дело?

– Поскольку благодаря наметившейся тенденции доля тяжелого физического труда уменьшается, то и привлечение прекрасной половины человечества в горную индустрию имеет тенденции к нарастанию. Женщины в качестве инженеров способны эффективно управлять процессами проектирования, организации, контроля процессов БВР, и, безусловно, здесь никаких ограничений нет.

■ В завершение интервью хочется узнать, в чем лично вы находите силы для эффективной работы как представитель управленческого состава, руководства вашей организации?

– Могу честно признаться, что меня вдохновляет работа в компании, безусловно лидирующей в области инноваций на нашем рынке БВР. Мы по праву занимаем эту нишу. Если говорить о валовом продукте, количестве взрывов, количестве поставленного взрывчатого вещества на рынке, мы в этом плане лидером не являемся, но в чем мы точно первые, это в экспертизе и продвижении суверенных инноваций. Безусловно, лично меня это вдохновляет. Мне нравится представлять нашу компанию как лидера в этой области.

Беседовала Наталья МИЛЕТЕНКО



Итоги Международной конференции «ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОМПЛЕКСНОЙ И ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО И НЕТРАДИЦИОННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ» (Плаксинские чтения – 2026)



Научный совет Российской академии наук по проблемам обогащения полезных ископаемых, ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ХФИЦ ДВО РАН), ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук» (ИПКОН РАН) провели Международную конференцию «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (50-е Плаксинские чтения). Конференция проходила 21–26 сентября 2026 года в городе Хабаровске. Форум объединил около 200 участников: ученых, исследователей, инженеров и представителей производственных компаний из Москвы, Санкт-Петербурга, Хабаровского, Приморского и Забайкальского краев, Иркутской, Новосибирской, Мурманской и Свердловской областей, Республики Коми, а также Кыргызстана.

Ежегодно обогатители России, ближнего и дальнего зарубежья, научное сообщество и производственники, ученики и последователи выдающегося ученого, основоположника современной гидрометаллургии благородных металлов и обогащения полезных ископаемых, члена-корреспондента РАН Игоря Николаевича Плаксина собираются на Плаксинские чтения для обсуждения актуальных вопросов глубокой комплексной переработки минерального сырья. Инициаторами и организаторами этих конференций были первый директор Института проблем комплексного освоения недр РАН академик РАН Н. В. Мельников, председатель научного совета РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых академик РАН В. А. Чантурия, который на протяжении 50 лет остается бессменным организатором и научным руководителем конференции. Мероприятие проводится ежегодно с 1977 года в разных городах России и за рубежом. За эти годы Плаксинские чтения стали ведущей площадкой для обмена научными достижениями и промышленными инновациями.

Конференция собрала ведущих ученых академических и отраслевых институтов, представителей крупных горно-металлургических компаний и зарубежных партнеров. Особое внимание было уделено стратегическим задачам освоения минерально-сырьевой базы Дальнего Востока, Арктики и Сибири, а также вопросам вовлечения в переработку техногенных образований и нетрадиционного минерального сырья.

Тема конференции точно отражает вызовы времени, связанные с необходимостью обеспечения технологического суверенитета России в области критических, редких и редкоземельных металлов. На территории ДФО выявлено более 80 видов полезных ископаемых. Здесь находятся единственные в Российской Федерации месторождения олова и сосредоточено 45 % золота, 35 % общероссийских запасов редкоземельных элементов, 40 % меди, более 60 % вольфрама и серебра, более 80 % запасов флюорита, более 70 % алмазов и урановых руд. Значительны также запасы титана, ванадия и других полезных ископаемых. Всего на территории ДФО насчитывается более 6 тысяч объектов, определяемых как месторождения твердых полезных ископаемых, причем в горнорудной отрасли ДФО наиболее распространена золотодобыча.



Губернатор Хабаровского края Дмитрий Викторович Демешин на открытии совещания выступил с приветственным словом
(источник https://khabkrai.ru/events/news/218720)

В Дальневосточном регионе реализуется ряд проектов и подготавливается к запуску ряд крупных объектов. Одним из них является Малмыжское золото-медно-порфировое месторождение в Хабаровском крае. В 2024 году была запушена первая линия обогатительной фабрики, а в 2025 году в промышленную эксплуатацию введена вторая линия АГМК. Новое производство не имеет аналогов в мире и стало первым в России по переработке золотосодержащих руд двойной упорности. Локализация вышеупомянутых месторождений и производств на территории Дальнего Востока, в частности Хабаровского края, требует ускоренного развития фундаментальных исследований и на их основе инновационных процессов в комбинированных обогатительно-гидрометаллургических технологиях.

В открытии конференции приняли участие губернатор Хабаровского края Дмитрий Демешин, который открыл совещание и выступил с приветственным словом, заместитель председателя правительства Хабаровского края по природным ресурсам и сельскому хозяйству Дарий Тюрин и министр природных ресурсов Александр Леонтьев.



Директор Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук академик Российской академии наук Игорь Юрьевич Рассказов

В приветственном слове к участникам конференции глава региона отметил, что горнодобывающая отрасль является драйвером роста экономики Хабаровского края. Внедрение инновационных научно-технических и технологических решений на горнодобывающих предприятиях позволит совместно с другими мерами поддержки горняков ускорить процесс развития горнодобывающей отрасли, что в целом имеет важное значение для экономического и социального развития края. Д. В. Демешин напомнил о недавней встрече с президентом России, в ходе которой в том числе он представил разработки ученых Хабаровского края, которые уже применяются в реальном секторе экономики.

«Хабаровский край богат минеральным сырьем. Мы добываем золото, серебро, медь, олово, работают крупные предприятия. Плюс в регионе сильная наука: институты ДВО РАН, вузы, исследовательские коллективы. Мы одни из немногих, кто разработал технологии извлечения ценных металлов из хвостохранилищ. Тайгу не распахиваем, а развиваем вторичную переработку, и весьма эффективно. Президент уделяет особое внимание эффективности горнодобывающей отрасли. Задача, которую он поставил, – технологический и сырьевой суверенитет, выпуск продукции с добавленной стоимостью. Наша цель – комплексное развитие территорий края и инвестиции в минерально-сырьевую базу. Уверен: результаты юбилейной конференции найдут применение в реальном секторе экономики», – подчеркнул губернатор.



Вступительное слово председателя научного совета Российской академии наук по проблемам обогащения полезных ископаемых, главного научного сотрудника Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, академика Российской академии наук Валентина Алексеевича Чантурия

Директор Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН академик РАН Игорь Юрьевич Рассказов в выступлении отметил, что проведение юбилейной научной конференции «Плаксинские чтения» является знаковым событием для Хабаровского края.

«Горнодобывающая промышленность Хабаровского края в последние годы активно развивается и играет все более значимую роль в экономике региона. Наличие полезных ископаемых и возможность их рационального извлечения и использования создают необходимые предпосылки для экономического роста и являются важным конкурентным преимуществом. Кроме того, современный горнодобывающий комплекс может выступать при определенных условиях локомотивом экономического и социального развития территорий. С ним связан целый ряд отраслей промышленности, включая энергетику, строительство, транспорт, машиностроение и многие другие. Активную роль при этом должна играть горная наука, так как для эффективной разработки полезных ископаемых требуются современные производительные и экологически сбалансированные технологии добычи и глубокой переработки минерального сырья и научно-техническое сопровождение горных работ на всех стадиях освоения месторождений», – подчеркнул академик РАН И. Ю. Рассказов.

Бессменный организатор Плаксинских чтений, председатель научного совета РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых, главный научный сотрудник ИПКОН РАН, академик РАН Валентин Алексеевич Чантурия во вступительном слове рассказал о роли лидера теории флотации полиметаллических руд Игоря Николаевича Плаксина в современной науке и указал, что тематика конференции полностью соответствует тем задачам, которые поставлены президентом Российской Федерации, правительством стра-

ны и Академией наук России по развитию минерально-сырьевой базы, добычи остродефицитных металлов для высокотехнологичной промышленности. Утвержденная в 2024 году Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации предусматривает высокий темп освоения новых знаний и создания наукоемкой продукции на собственной технологической основе, что во многом определяет конкурентоспособность и эффективность национальной экономики.

В работе пленарного заседания принял участие главный редактор журнала «Маркшейдерия и недропользование», профессор, доктор технических наук Юрий Витальевич Дмитрак, который выступил докладом, посвященным разработке фундаментальных основ теории разрушения горных пород в мельницах различных типов и созданию комплекса виброизмерительного оборудования для определения параметров ударных импульсов в мелющей загрузке в различных типах мельниц.

Отличительной чертой пленарных лекций и докладов секций является растущее внимание ученых к проблемам глубокой переработки труднообогатимого и упорного сырья. Представлены прорывные результаты по селективному выделению циркония, гафния и РЗЭ из эвдиалитовых концентратов методами химического осаждения, обоснованы технологии автоклавного и биоокисления двойных упорных золото-сурьмяных концентратов, инновационные подходы к прямому извлечению лития (DLE) из подземных рассолов с применением сорбентов и электродиализа.

В работе пленарного заседания и секций конференции приняли участие 2 действительных члена Российской академии наук, 2 члена-корреспондента Российской академии наук, 15 докторов наук, 33 кандидата наук.

Работа конференции проходила в рамках пяти секций.

На секции «Современные технологические решения в процессах переработки минерального сырья» были представлены уникальные технологические решения в области обогащения полиметаллических, железных руд, алмазосодержащих кимберлитов, некондиционных марганцевых руд, а также получения кварцевых концентратов ультравысокой чистоты.



Главный редактор журнала «Маркшейдерия и недропользование», профессор, доктор технических наук Юрий Витальевич Дмитрак выступил с пленарным докладом на конференции

На секции «Технологическая минералогия, рудоподготовка, тонкое и сверхтонкое измельчение минерального сырья» актуальность методов технологической минералогии продемонстрирована на примере получения уникального углеродсодержащего и кварцевого сырья, комплексных бокситовых, медных, оловянно-вольфрамовых, железных руд, нетрадиционных источников стратегических металлов, медно-кобальтовых руд и лопаритового сырья.

Основные направления на секции «Флотация, гравитация, магнитная и электромагнитная сепарация были представлены результатами научного обоснования и внедрения методов интенсификации флотации, применения отечественных флотационных реагентов; развития квантово-химиче-



Участники Международной конференции «Плаксинские чтения – 2026»



Представители Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук приняли участие в работе секций

ского, термодинамического и имитационного моделирования флотационных процессов; совершенствования конструкций флотомашин и развития и интенсификации комбинированных магнитно-гравитационных схем.

Вопросы, обсуждаемые на секции «Комплексная переработка минерального сырья, гидрометаллургические процессы», касались переработки упорного золотосодержащего сырья, комплексного извлечения ценных компонентов из полиметаллических руд и техногенного сырья, интенсификации гидрометаллургических процессов.

На секции «Экологические и экономические аспекты процессов переработки техногенного сырья» особое внимание было уделено разработке экологически безопасных технологий переработки руд сложного вещественного состава, правовым, информационным и технологическим вопросам разработки техногенных месторождений.

Конференция отметила актуальность решаемых научных задач, важность экологически безопасных обогатительно-гидрометаллургических процессов, замкнутых циклов водооборота и методов очистки подотвальных вод с использованием природных и техногенных сорбентов.

На конференции неоднократно подчеркивалась высокая практическая значимость полученных результатов, которые будут востребованы в реальном секторе экономики, в частности на предприятиях АО «АГМК», АК «АЛРОСА», ПАО «ГМК «Норильский никель» и других компаниях.

На конференции были вручены дипломы и памятные подарки пяти молодым ученым за лучшие доклады, а также благодарственные письма от предприятий наставникам молодежи.

В соответствии с поручениями Правительства РФ по развитию минерально-сырьевой базы в остродефицитных металлах для высокотехнологической промышленности конференция считает целесообразным:

– объединить исследования ведущих организаций РАН, отраслевых институтов и инжиниринговых компаний по разработке экологически безопасных гидрометаллургических и биогидрометаллургических технологий извлечения стратегических металлов (РЗЭ, Li, Zr, Hf, Sc, Co) из комплексных руд, упорных концентратов и техногенных источников;

– интенсифицировать исследования по созданию отечественных высокоселективных экстрагентов, сорбентов и ионообменных мембран для прямого извлечения лития (DLE) из высокоминерализованных подземных рассолов Сибирской платформы;

– обеспечить создание новых технологических решений по переработке эвдиалитового и лопаритового сырья с организацией процессов регенерации реагентов и получением



Благодарственное письмо от Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук главному инженеру обогатительной фабрики Малмыжского горно-обогатительного комбината Дмитрию Викторовичу Першикову вручает профессор, доктор технических наук Елена Леонидовна Чантурия

чистых оксидов и солей редкоземельных и редких металлов;

– разработать и обеспечить промышленное производство высокоэффективных отечественных реагентов-заменителей цианида для выщелачивания золота, а также био-реагентов для окисления упорных золото-сульфидных и золото-сурьмяных концентратов;

– усилить координацию исследований по разработке технологий комплексного использования гидроминерального сырья и техногенных отходов (золошлаков, хвостов обогащения) методами термо-гидрохимической активации и кислотного выщелачивания;

– расширить применение методов математического моделирования, машинного обучения и цифровых двойников для оптимизации гидрометаллургических и флотационных переделов, а также для управления процессами сгущения и фильтрования;

– рассматривать эффективность переработки техногенных отходов и монетизацию горнопромышленных отходов как фактор устойчивого развития горно-металлургических компаний и снижения экологических рисков, включая создание замкнутых систем водооборота и глубокой очистки подотвальных вод;

– обратить внимание Росприроднадзора на правовые, информационные, институциональные барьеры, препятствующие разработке техногенных месторождений, в особенности малообъемных, например техногенных золотых россыпей, так как методическая база устарела и не предназначена для техногенного сырья, что снижает заинтересованность природопользователей в разработке техногенного сырья;

– инициировать исследования, направленные на преодоление барьеров, ограничивающих эффективную разработку техногенных месторождений;

– выполнить работу по определению перспективной кадровой потребности и создать систему учета кадрового потенциала;

– провести работу по интеграции сохранившихся изолированных систем профессиональной подготовки кадров в единую систему подготовки инженерных и рабочих кадров в рамках субъектов РФ, позволяющих объединить управленческий, образовательный, производственный потенциал учебных, научных учреждений и работодателей страны для стабильности и увеличения производственного потенциала горной отрасли;

– обратиться в Минпромторг РФ с предложением организации работы по аналитическому исследованию потребности России в литии, цирконии и редкоземельных металлах, прогнозу их производства и разработке программы развития отечественного производства на базе внедрения инновационных гидрометаллургических технологий;

– интенсифицировать исследования по природосберегающим технологиям использования уникальных минеральных ресурсов Арктической зоны РФ и Дальнего Востока, включая развитие научного потенциала региональных центров (ХФИЦ ДВО РАН, ИПКОН РАН).

На конференции решено провести Международную конференцию «Плаксинские чтения – 2027» на площадке Забайкальского государственного университета.

В рамках конференции участники посетили ЦКП «Центр исследования минерального сырья (ЦИМС)» при Институте горного дела ДВО РАН, а также побывали на промышленной площадке Малмыжского месторождения – одного из крупнейших в России золото-медно-порфировых месторождений. Запасы Малмыжского месторождения оценивают более чем в 2 миллиарда тонн руды, в том числе более 8,3 миллиона тонн меди и 347 тонн золота.

Работа Международной конференции «Плаксинские чтения – 2026» освещалась в средствах массовой информации и на онлайн-ресурсах ХФИЦ ДВО РАН и ИПКОН РАН.

Материалы конференции опубликованы в сборнике «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2026), г. Хабаровск, 21–25 сентября 2026 г.: материалы Международной конференции. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2026. 520 с. ISBN 978-5-262-01038-7. Статьи размещаются на сайте научной электронной библиотеки (elibrary.ru), интегрированной с РИНЦ.

Участники конференции выражают признательность организаторам: Институту проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова РАН и Хабаровскому федеральному исследовательскому центру ДВО РАН за проведение конференции на высоком научно-техническом уровне.



Участники конференции на промышленной площадке Малмыжского месторождения

55 лет Милетенко Наталье Александровне

26 октября 2026 года исполняется 55 лет Милетенко Наталье Александровне — известному ученому, обогатившему горные науки своими трудами в области геомеханики, управления гидрогеомеханическими процессами. Научные интересы Н.А. Милетенко связаны с обеспечением безопасного ведения горных работ в районе влияния на водные объекты и охраной окружающей среды при освоении недр.

Ее научная деятельность посвящена развитию научных основ управления гидрогеомеханическими процессами и сохранения окружающей среды при освоении недр. В ее работах раскрыто понятие комплексного подхода к решению геомеханических задач, основанного на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и имеющих инновационную направленность.

В ее научных трудах проведена систематизация и впервые представлена научно-обоснованная классификация условий подработки водных объектов, позволяющая выбирать методы управления гидрогеомеханическими процессами, в наибольшей степени соответствующие природным горно-геологическим, гидрогеологическим и экологическим факторам. В том числе разработаны природоохранные мероприятия по предупреждению негативных последствий и сохранению окружающей среды техногенно-измененного массива горных пород вблизи водных объектов.

За полученные научные результаты Милетенко Н.А. была награждена высшей ведомственной наградой для молодых ученых - медалью РАН имени М.В. Ломоносова в области Наук о Земле за работу «Управление гидрогеомеханическими процессами и сохранение окружающей среды при освоении недр» (2005 г.). Ее последующие результаты были также отмечены Почетной грамотой Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (2011 г.), Медалью Минобрнауки РФ «За безупречный труд и отличие» III степени (2021 г.), Нагрудным знаком Минприроды РФ «Отличник охраны природы» (2022 г.), наградой Ветеран Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (2026 г.).

Она внесла значительный личный вклад в совершенствование нормативно-методического обеспечения ведения горных работ, являясь соавтором Методических указаний по определению параметров опасных зон на горных предприятиях АК «АЛРОСА» Москва, Мирный, 2007; Методического руководства по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей, С.-Пб., Москва, 2009. Является автором 6-ти патентов и 130 печатных работ (в том числе 1 учебника «Геомеханика» для ВУЗов) по направлению рационального освоения недр. Материалы ее научных исследований включены в сборник докладов XIII Международного форума «Экология 2022», организованного Государственной Думой и Министерством природных ресурсов и экологии РФ.

Многогранна научно-организационная деятельность Н.А. Милетенко. С 2002 г. по 2019 г. она – председатель Совета молодых ученых и специалистов ИПКОН РАН. Организатор ежегодной Международной Школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Проводимая при ее активном участии конференция за эти годы стала одной из самых интересных и популярных на территории России и стран СНГ по направлению Наук о Земле. С 2014 г. – Н.А. Милетенко заместитель председателя постоянно действующей конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр», которая успешно в 7-й раз прошла в 2026 году. Милетенко Н.А. член Ученого Совета ИПКОН РАН.



С 2009 по 2012 член Совета молодых ученых Российской академии наук, координатор по Отделению наук о Земле Совета молодых ученых РАН. Координатор программы «Молодые ученые России» на ТВ канале «Просвещение» (более 40 программ, в том числе 3 из них - по направлениям Наук о Земле с привлечение молодых и ведущих ученых ИПКОН РАН). С 2009 года Милетенко Н.А. ведет активную работу по популяризации научных знаний среди школьников. В ряде школ г. Москвы ею организованы и проведены научно-популярные лекции по направлению наук о Земле по темам охраны водных ресурсов России, способов снижения влияния техногенной нагрузки на окружающую среду при добыче и последующей переработке минерального сырья. Эта работа заслуженно отмечена Благодарственным письмом Префектуры ЮЗАО за достойное воспитание детей и большую общественную работу, проводимую в ЮЗАО. С 2021 г – член редколлегии журнала «Маркшейдерия и недропользование» (ученый секретарь), член Союза писателей России с 2021 г, член Федерации деятелей культуры и искусства России с 2025 г.

На протяжении всей своей научной деятельности Милетенко Н.А. вносит значительный вклад в развитие международного научного сотрудничества. Как активный организатор и участник совместных международных научных мероприятий ИГД им. Д.А. Кунаева, Фонда Первого Президента РК и приглашенный лектор КазНИТУ им. К.И. Сатпаева на территории Казахстана, Милетенко Н.А. отмечена Благодарственным письмом Фонда Первого Президента Республики Казахстан за активное участие в мероприятиях Совета молодых ученых при Фонде Первого Президента РК и плодотворное сотрудничество.

Ее многочисленные статьи, учебник, патенты внесли значительны вклад в направление наук о Земле и охрану окружающей среды. Ее труды заслуженно отмечены межотраслевым знаком «Горняцкая слава» III и II степени (2007г., 2011г.), Серебряным знаком (2011 г) и Золотым знаком (2024 г.) Союза маркшейдеров России за большой вклад в маркшейдерское дело, обеспечение рационального использования и охраны недр, Знаком адъюнкт горных наук с присуждением звания адъюнкта горных наук России (2014 г.), в 2022 году стала победителем конкурса WIM Russia «Талантливая женщина в добывающей отрасли» в номинации «Золотая идея года» за популяризацию научных знаний среди школьников и молодых ученых в области наук о Земле и охраны окружающей среды, Призером этого конкурса в 2023 г также в номинации «Золотая идея года», Лауреатом конкурса «Талантливая женщина в современной индустрии» 2025 г в номинации «Социальный/волонтерский проект года» за вклад в помощь жителям новых территорий, помощь воинам, а также просветительскую работу среди молодежи и населения о значимости Донбасса для России как горнодобывающего и металлургического региона (в том числе посредством своей поэзии о Донбассе и шахтерском труде), автор 3-х сборников стихотворений, автор слов Гимна Ассоциации женщин современной индустрии. Милетенко Н.А. активный участник многочисленных поэтических конкурсов и мероприятий: публикуется в литературно-художественном издании «Московский Альманах», соавтор сборника «Позывной поэт» (2025 г.), участник Международного музыкально-поэтического фестиваля имени М.Л. Матусовского «Подмосковные вечера». Имеет различные награды субъектов РФ, учреждений и общественных организаций: «Медаль Н.С. Лунев - за верность Донбассу» 2024 г., Медаль «80-лет Великой Победы» 2025 г., Благодарность от Представительства Донецкой народной республики в Москве «За содействие и активное участие в интеграционных процессах ДНР в Российскую Федерацию, поддержку в реализации социальных мероприятий, направленных на оказание всесторонней помощи жителям ДНР» 2025 г., Благодарность от Центральной городской клинической больницы №9 г Донецка «За поддержку и оказание гуманитарной помощи» 2025 г. Гражданская и патриотическая лирика Н.А. Милетенко отмечена Почетной грамотой «За активную работу по патриотическому и духовно-нравственному воспитанию молодежи в рамках проектов ГБУ г. Москвы «Московский дом национальностей» и XII Межрегионального творческого фестиваля славянского искусства «Русское поле» 2024 г., Дипломом участника концерта «Россия-Родина моя», организованного к 80-летию со Дня Победы в ВОВ управой района Замоскворечье г Москвы. 2025 г., Почетной грамотой от Организации ветеранов ДНР «За активное участие в открытом литературном конкурсе «Какой была победа долгожданной», посвященном 80-летию Победы над немецко-фашистскими захватчиками в Великой отечественной войне» 2025 г и мн.др.

Редакция журнала «Маркшейдерия и недропользование» поздравляет Наталью Александровну с юбилеем, благодарит её за вклад в развитие и становление журнала.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.234.42
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-16-21

ORIGINAL ARTICLE
UDC 622.234.42

Technology for increasing the oxidation potential of recycled solutions for uranium in-sit leaching

Ye. S. Oryngozhin[1,2], R. A. Yusubaliev[3], Ye. Ye. Oryngozha[4]✉, I. M. Malakhova[5]
[1]Institute of Mining after D. A. Kunaeva, Almaty, Republic of Kazakhstan
[2]Kazakh National University after Al-Farabi, Almaty, Republic of Kazakhstan
[3]National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan
[4]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan
[5]Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N. V. Melnikov Russian Academy of Sciences - IPKON RAS, Moscow, Russian Federation
✉ *ye.oryngozha@aues.kz*

Abstract. This article presents theoretical studies of the physicochemical mechanisms of leaching processes related to the oxidation-reduction conditions of the environment, the ability of elements to form compounds with other elements, form ions of varying valence, yield soluble or gaseous compounds. The Semizbay deposit's ores are visually indistinguishable from the host rocks and are distinguished only by sampling. Uranium is found in these ores in both mineral and sorbed forms. The ores are primarily loose and poorly cemented; carbonate ores make up 20% of the deposit's ores and are the primary acid absorbers during sulfuric acid leaching. The ionic composition of the uranium leaching solution during the acidification stage of the formations was analyzed, and the interaction of sulfuric acid solutions with the ore-hosting rocks was assessed.

Keywords: research, regularity, in-situ leaching, physicochemical processes, oxidation potential, elements, compounds, uranium
For citation: Oryngozhin Ye., Yusubaliev R., Oryngozha Ye., Malakhova I.M. Technology for increasing the oxidation potential of recycled solutions for uranium in-sit leaching. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 16-21. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-16-21.

Технология повышения окислительного потенциала регенерированных растворов для подземного выщелачивания урана

Е. С. Орынгожин[1,2], Р. А. Юсубалиев[3], Е. Е. Орынгожа[4]✉, И. М. Малахова[5]
[1]Институт горного дела имени Д. А. Кунаева, г. Алматы, Республика Казахстан
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан
[3]Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
[4]Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан
[5]Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация
✉ *ye.oryngozha@aues.kz*

Резюме. В данной статье представлены теоретические исследования закономерностей физико-химических процессов выщелачивания, которые связаны с окислительно-восстановительной обстановкой среды, способностью элементов вступать в соединения с другими элементами, образовывать ионы различной валентности, давать растворимые или газообразные соединения и т.д. При этом вещественно-минералогический состав рудообразующих элементов и состав растворителей, участвующих в процессе выщелачивания, определяют характер химических реакций, расход реагентов и в целом геохимические условия выщелачивания урана. Руды месторождения Семизбай визуально не отличаются от вмещающих пород и выделяются только по результатам опробования. Уран в них находится в минеральной и сорбированной формах. Руды представлены в основном рыхлым и слабо сцементированным материалом; руды на карбонатном цементе - карбонатные руды составляют 20% руд месторождения и являются основными поглотителями кислоты при сернокислотном выщелачивании. Проведен анализ формирования ионного состава раствора выщелачивания урана на стадии закисления пластов и дана оценка взаимодействия сернокислотных растворов с рудовмещающими породами. Анализ выпол-

© Oryngozhin Ye. S., Yusubaliev R. A., Oryngozha Ye. Ye., Malakhova I. M., 2026

нен по данным полученным с полигонов ПВ Казахстана. При начале работ на месторождении Семизбай способом ПВ, ионный состав растворов будет уточняться.

Ключевые слова: исследования, закономерность, подземное скважинное выщелачивание, физико-химические процессы, окислительный потенциал, элементы, соединение, уран

Для цитирования: Орынгожин Е.С., Юсубалиев Р.А., Орынгожа Е.Е., Малахова И.М. Технология повышения окисли-тельного потенциала регенерированных растворов для подземного выщелачивания урана. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 16-21. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-16-21.

Introduction

The efficiency of mining the Semizbay uranium deposit using sulfuric acid leaching depends on the correct selection of in-situ leaching (CSL) technology parameters. This, in turn, depends on a proper understanding of the physical and physicochemical processes that determine the geochemical conditions for the dissolution, transport, and precipitation of substances during uranium leaching.

Sorbed uranium in ores is associated with carbonized plant fragments, clay minerals of cement, and iron hydroxides. Uranium minerals include coffinite, pitchblende, uranium black, and rare secondary minerals. In addition, uranium-bearing ilmenite, titanomagnetite, and leucoxene are present in small quantities [1-3].

The ore-bearing rocks of the deposit contain both poorly soluble and readily soluble minerals-carbonates, sulfides, etc. The presence of CO_2 in the environment leads to the dissolution of calcium and magnesium carbonates and the formation of readily soluble bicarbonates [3, 4]:

$$CaCO^3 + H^2O + CO^2 \rightarrow Ca(HCO^3)^2 \text{or}$$
$$2CaCO^3 + H^2SO^4 \rightarrow CaSO^4 + Ca(HCO^3)^2 \quad (1)$$

The primary acid absorbers during leaching are the minerals that cement the rock. The main cement minerals are: hydromicas, kaolinite, montmorillonite, ferrous chlorites or mixed-layer minerals of chlorite-montmorillonite composition, carbonates, iron hydroxides, allophane group minerals, and other difficult-to-detect minerals.

The most common clay mineral, found in virtually all types of ore-bearing rocks, is hydromica. Its content varies depending on the lithological type of the rock, from 3-5% to 15-25%. Hydromica forms cryptocrystalline aggregates and develops primarily after detrital micas and feldspars.

Kaolinite is found almost everywhere, but in relatively smaller quantities than hydromica. Its highest contents, up to 15-20%, are observed in gray-colored and bleached gray-colored fine-grained rocks. In the permeable part of the section, its content does not exceed 1-10%. Montmorillonite, like hydromica and kaolinite, is one of the main components of the clay cement of ore-bearing rocks. Its content ranges from 0 to 10-15%, averaging 6-7% in individual sections (including clay-silt deposits) [5-8].

According to the activity of interaction with sulfuric acid, the minerals that make up the rock cement can be arranged in the following order: calcite, ferrous dolomite, iron oxides, mixed-layer chlorite-montmorillonite, siderite, chlorite, iron oxides, montmorillonite, hydromica, kaolinite, carbonized organic matter.

Research methods

Clay minerals dissolve significantly more slowly, throughout virtually the entire leaching process. The proportion of reagent consumed by this group of minerals is complexly dependent on their quantity, active surface area (size of crystalline aggregates), and contact time with the solvent. With prolonged leaching, reagent consumption for this group of minerals can reach significant levels. The proportion of acid consumed by other minerals, due to their small quantities, is insignificant. Table 1 shows the solubility product of some chemical compounds in the ore-bearing rocks of the Semizbay deposit.

Table 1 / Таблица 1

Solubility of some chemical compounds in the ore-bearing rocks of the Semizbay deposit / Растворимость некоторых химических соединений в рудовмещающих породах месторождения Семизбай

Sulfides, g/l			
FeS	$4{,}0 \times 10^{-19}$	MnS	$1{,}4 \times 10^{-15}$
PbS	$1{,}0 \times 10^{-29}$	CuS	$8{,}0 \times 10^{-37}$
Sulfates, g/l			
$PbSO_4$	$2{,}0 \times 10^{-8}$	$CaSO_4$	$6{,}1 \times 10^{-5}$
Carbonates, g/l			
$PbSO_3$	$1{,}5 \times 10^{-13}$	$FeSO_3$	$2{,}5 \times 10^{-11}$
$MnCO_3$	$1{,}0 \times 10^{-10}$	$MgCO_3$	$1{,}1 \times 10^{-5}$
$CaCO_3$	$4{,}8 \times 10^{-9}$	$CaSO_3$	$1{,}4 \times 10^{-10}$

An analysis of the ionic composition of uranium leaching solutions during the acidification stage of the formations was conducted, and the interaction of sulfuric acid solutions with ore-bearing rocks was assessed. The analysis was based on data obtained from leaching sites in Kazakhstan. The ionic composition of the solutions will be refined when leaching operations at the Semizbay deposit commence.

Below is a brief summary of the work performed.

In solutions, uranium can exist in four valence states: U^{3-}, U^{4+}, U^{5+}, and U^{6+}. Uranium's multivalence is due to the different energy bonds of the electrons in its shells. This variable valence leads to the formation of various uranium complexes. When leached in an acidic medium, uranium forms divalent uranyl cations (UO^{2+}), and in an alkaline medium, uranite anions. It has a weak affinity for sulfur and a strong affinity for oxygen.

Aqueous solutions of trivalent uranium salts are highly unstable. Tetravalent uranium salts form more stable solutions. Atmospheric oxygen oxidizes tetravalent uranium in aqueous solutions to hexavalent uranium. Pentavalent uranium forms the uranyl radical (UO) in aqueous solutions in an extremely unstable form, converting into tetravalent and hexavalent uranium ions. Compounds of hexavalent uranium are of practical interest for uranium extraction using sulfuric acid leaching. All such compounds are characterized by the formation of the uranyl ion, which determines the properties of aqueous solutions of uranyl salts during leaching.

Analysis of the graph shows that increasing the solution pH from 0.5 to 1.5-2.0 leads to a decrease in the uranyl cation content

and a sharp increase in the content of uranyl sulfate complexes in the solution. A further increase in the solution pH from 2.0 to 2.5 leads to the virtual disappearance of the uranyl cation and the replacement of neutral uranyl sulfate molecules with uranyl disulfate and uranyl trisulfate anions. In the pH range of 2.0-2.5, the uranyl trisulfate content increases to 90-100%.

A further increase in pH to 3.0-3.5 leads to the polymerization of ions with the formation, as a result of hydrolysis, of complex ions of uranyl dimer tridisulfate $[UO_2O_5(SO_4)_3]^{4-}$, $[UO_2O_5(SO_4)_2]^{2-}$. Experience in processing leach solutions allows us to conclude that conducting sorption in the $pH = 3.0 - 3.5$ mode leads to an increase in the sorption capacity of the resin for uranium due to the fact that the resin sorbs predominantly divalent metal complexes, which are absorbed by strongly basic anion exchangers more intensively than tetravalent ones [3, 6].

Based on the above, the leaching process must be carried out with constant monitoring of the pH, Eh of the solution, and the content and percentage ratio of uranyl sulfate ion complexes, maximizing the formation of uranyl dimer disulfate complex ions $[UO_2O_5(SO_4)_2]^{2-}$ in productive solutions.

In addition to useful metals, macroimpurities of SO_4^{2-}, $HSO_4^-, CO_3^{2-}, HCO_3^-$, Ca_2^+, Mg_2^+, Fe_2^+, NO_3^-, Al_3^+, Cu^+, Mn_4^+, Ti, Ni, Zr, Bi, Li, Zn and other ions are formed in sulfuric acid leach solutions during the acidification stage of the formations.

It is important to note the depressant effect of certain anions in the leaching solution on sorption. This effect is exerted by the following ions: SO_4^{2-}, $NO_3^-, Cl^-, P^-$and PO_4^{3-}.

Low-polymer (mono- and dimeric) silicic acids (α and β-forms) formed in the solution have a strong toxic effect on resins. The most stable regions of existence of low-polymer silicic acids are formed at pH +1 to +3. Cases of resin poisoning by the accumulation of VO_3^-, VO_4^{3-}, $MoO_4^{2-}$and MoO_4^2 - anions have also been observed. Removal of these anions is only possible by leaching the resin with special solutions ($NaOH$, NH_4NO_3, $NaNO_3$, NaN, etc.).

Results

Since the primary goal of this study is to significantly reduce sulfuric acid consumption during uranium leaching, it is necessary to briefly examine the leaching process.

The leaching process is significantly influenced by the interaction of the sulfuric acid solution injected into the formation with non-metallic minerals in sedimentary rocks. Moreover, the redox environment in the leaching zone changes significantly at different stages of the process and directly depends on changes in the ionic composition of the solution and its changing ionic strength.

During the first stage of leaching (acidification), the presence of carbonates in the rocks accounts for the majority of acid consumption, creating a different CSL environment than during the subsequent leaching stage. Only after the carbonates have disappeared do the much slower reactions with aluminosilicates become decisive. The stage-by-stage change in the ionic strength of the resulting solutions, the moments of equilibrium and carbonate disappearance, and the changes in Eh and pH can be calculated using thermodynamic analysis using specialized computer programs (in particular, "Selector").

The relatively high rate of interaction of sulfuric acid solutions with carbonates, on the one hand, and the significant duration (from several weeks to several months) of the stay of solutions in the subsoil make it possible to interpret the chemistry of the CSL process at the acidification stage using calculation methods, which is much more difficult to do at the subsequent dynamic stages of CSL.

Since the process flow diagram used at CSL sites and in Kazakhstan involves the use of recycled solutions containing a number of petrogenic elements (Ha, K, Ca, Mg, Al, Fe), as well as C^- and NO_3^- ions, their influence on the change in ORP during interaction with carbonates in mineralized sulfuric acid solutions cannot be ignored. The interaction of sulfuric acid solutions with carbonates is accompanied by a significant increase in pH, and in addition to simple metal ions and their sulfate complexes, well-known hydrocomplexes, as well as bicarbonate and carbonate complexes, appear in the solutions.

Calculating equilibria in such complex systems, necessary for developing management decisions for the CSL process, is impossible without the use of a computer. The equilibrium principle allows for the application of the free energy minimization method (I.K. Karpov's method, applied to multicomponent heterogeneous systems containing an aqueous electrolyte solution and a gas phase) for the quantitative analysis of irreversible chemical processes. The "Selektr" program allows for the quantitative characterization of not only the overall equilibrium in the system but also the concentration of components in the CSL solution, as well as the molar amounts of substances in the solid phase, depending on the degree of reaction. This will allow us to describe the intermediate state of the system as it progresses toward full equilibrium and to objectively assess the dynamics of CSL changes.

Based on available experimental data, production data, and publications [9-12], the interaction of sulfuric acid solutions with ore-bearing rocks can be characterized as follows:

The deposition of material and the formation of zoning near the injection well continue until calcite completely disappears from all zones containing newly formed formations, after which the newly formed formations begin to dissolve and redeposit in calcite-bearing rocks closer to the pumping wells. When fresh portions of solution enter the injection well, the process continues with the dissolution of the redeposited formations and the movement of zoning toward the pumping well until the gypsum of the first zoning completely reaches the pumping well. The composition of the solutions entering the pumping well and subsequently reaching the surface depends on the composition of the zone closest to the pumping well. As long as carbonates are present in the rocks, the flow of solutions into the pumping well is accompanied by the release of carbon dioxide, which should lead to a significant increase in the solution pH and the precipitation of dolomite, calcite, and nesquegonite ($CaCO_3$; $CaMg(CO_3)_2, MgCO_3, 3H_2O$).

Discussion of Results

Since the solution remains in the pumping well for a short time, it can be assumed that carbonate precipitation due to CO_2 removal occurs primarily at the surface. The precipitated carbonates should soon dissolve—after acidic solutions begin to flow from the pumping wells. After the carbonates disappear from the rocks, solutions enriched in aluminum (pH 4.5-5.0) and ferric iron (pH 2-2.5) will successively flow to the surface. The calcium contained in the carbonates is converted into gypsum, and only a small portion is carried out into the pumping well.

The formation of solid phases results in chemical clogging of

the pore space of ore-bearing rocks, which significantly impacts the subsequent uranium leaching process. Precipitates containing aluminum and trivalent iron form in relatively small quantities and persist for a short time. Gypsum clogging is the main cause of complications during SSL.

From the above, it's clear how complex the acidification process is. It's drawn out over time, dissolution alternates with precipitation and then dissolution again, and so on. At each stage, the equilibrium in the system of chemical reactions is disrupted, and the system's pH and Eh change. It's virtually impossible to clearly and quantitatively track these changes in space-time coordinates (from injection to production wells). Therefore, all possible theoretical solutions are, and will remain, purely approximate.

During uranium leaching, the reaction of the solvent with rock-forming minerals forms mobile geochemical barriers (acid-base and redox) with alternating events of uranium dissolution and precipitation due to changes in the pH and Eh of the environment. In this process, acid is consumed not only and not so much for uranium leaching, but also for dissolving the rock-forming minerals, reaching tens and hundreds of kilograms per kilogram of uranium in real conditions. The main acid-intensive minerals are carbonates (calcium, dolomite, magnesite) and some types of clay minerals.

Due to the consumption of H_2SO_4 in reaction with rock-forming minerals, its concentration front moves significantly more slowly than if only uranium leaching were occurring. The concentration front of dissolved uranium tends to overtake the acid front, but this does not occur because, as the solution's acidity decreases, uranium hydrolysis occurs on the acid front, leading to redeposition according to the following scheme [3, 7]:

$$\begin{gathered} UO_2^{2+} + OH^- = UO_2OH^+ \\ UO_2OH^+ + OH^- = UO_2(OH)_2 \downarrow \end{gathered} \quad (2)$$

In this case, the acid concentration front acts as a mobile alkaline barrier. Then, as new portions of acid approach, the redeposited substance dissolves again, i.e., the reaction proceeds in reverse. Repeated steps lead to an increase in the H_2SO_4 concentration at the mobile barrier to the saturation concentration.

It is known that the oxidation-reduction potential is directly related to the concentration of the potential-determining components of the system:

$$E = E_0 + \frac{0.059}{n} lg\ lg\ \frac{[O_k]}{[B_0]} \quad (3)$$

From the perspective of potential-determining systems, the association of uranium and iron is of greatest interest at uranium deposits in formation oxidation zones. The reaction between uranium and iron in an acidic environment proceeds toward the oxidation of uranium and the reduction of iron.

Oxidation potentials for iron:

$$\begin{gathered} Fe - 0.44 \longrightarrow Fe^{2+} + 0.771 \longrightarrow \\ Fe^{3+} + 1.9 \longrightarrow FeO_4^{2-} \end{gathered} \quad (4)$$

In turn, at Eh +0.35, tetravalent uranium transforms into hexavalent hydrated oxide $UO_2(OH)_2$ and further at Eh +0.407 into the hexavalent divalent uranyl cation. The oxidation of uranium with trivalent iron ions proceeds according to the reaction where uranium is oxidized to the hexavalent form and iron is reduced to the divalent form [3, 8, 13-15].

During the SSL process, complexation significantly influences changes in the oxidation environment. During acid leaching, in addition to uranyl sulfate complexes UO_2SO_4, $[UO_2(SO_4)_2]^{2-}, [UO_2(SO_4)_3]^{4-}$, about half of the calcium, magnesium, and manganese are bound into sulfate complexes. Up to 80% of aluminum and over 90% of iron are bound into sulfate complexes. The proportion of simple ions decreases with increasing total concentration in the sulfate sulfur solution, pH and Eh change, and the content of free SO_4 ions decreases. Complexation causes a shift in the acidity of the SSL solution at geochemical barriers toward increasing pH values, and to maintain the oxidation and dissolution of uranium, it is necessary to increase the consumption of H_2SO_4.

However, given that the repeated circulation of sulfuric acid solutions between pumping and injection wells accumulates up to 0.05 mol/L or more of ferrous sulfate ($FeSO_4$) in the circulating solutions, maintaining the required CSL level can be accomplished without additional consumption of sulfuric acid or other oxidizing reagents. To achieve this, consideration should be given to the chemical effects of ultrasound on liquids during cavitation. Cavitation occurs in liquids due to the creation of negative pressures during the propagation of ultrasonic waves. Acoustic cavitation is characterized by small bubble sizes (10-3 – 10-2 cm). The pressure inside a cavitation bubble is initially very low compared to the pressure in the liquid. The liquid then rushes toward its center, and the bubble collapses (annihilates). As it collapses, a pressure peak forms in the central region of the bubble, and a spherical shock wave travels outward into the liquid. The pulsation and collapse of cavitation bubbles creates an exceptionally high energy density, stimulating a variety of chemical reactions.

Conclusion

Unlike traditional uranium mining methods, borehole leaching plants can be built in sequential stages using a modular approach. Capital investment in establishing a borehole leaching plant is 3-4 times lower, operating costs are 2-3 times lower, and the production cost is 5-6 times lower. The operating cost structure of a borehole leaching plant is also unique and consists of drilling and surface pipeline costs (17-23%), reagent costs (30-45%), and energy costs (8-15%). The specific costs of drilling and equipping wells are determined by the depth of the ore-bearing strata and the design features of the constructed wells.

The final assessment of the industrial and operational value of a deposit is based on the results of pilot work and observations of the leaching process parameters at the test site. Dissolution of clay minerals occurs significantly more slowly, occurring virtually throughout the entire leaching process, and the proportion of reagent consumed for this group of minerals is complexly dependent on their quantity, active surface area (size of crystalline aggregates), and contact time with the solvent. With prolonged leaching, the reagent consumption for this group of minerals can reach significant levels. The share of acid consumption for other minerals, due to their small quantities, is insignificant.

Determination of the chemical composition of productive solutions for each pumping well and for the collecting manifold, as well as uranium – daily; pH - once per day; Eh - once every 5-10 days; total mineralization, $SO_4^{2-}, Fe_2^+, Fe_3^+$ - once every 10-30 days; $Al_3^+, HCO_3^-, CO_3^{2-}$ – once every 5-10 days (during the formation preparation stage for leaching); free H_2SO_4, an

oxidizer - once every 5-10 days (during the leaching stage). Samples of collecting manifold solutions are taken once every 10-30 days for a full chemical analysis, including determination of $Ca_2^+, Mg_2^+, NO_3^-, Cl^-, P, Si$ and other components.

Determination of sulfuric acid, pH, and oxidizer content in working solutions is performed daily. Total mineralization of working solutions is measured every 10-30 days.

Suspended solids content is determined monthly in working solutions, and once every 10 days in pumping well solutions and the collection manifold.

REFERENCES

1. Avdokhin V.M. Fundamentals of Mineral Beneficiation. Textbook for Universities: In 2 Vol. Moscow: Moscow State Mining University Publishing House, 2016. Vol. 1. 417. (in Russ.).
2. Lynch A.J. Crushing and Grinding Cycles. Modeling, Optimization, and Control: Translated from English. Moscow: Nedra, 2015: 343. (in Russ.).
3. Lazareva O.V., Podkamenny Yu.A. Automated Method for Controlling a Complex for Grinding and Classifying Diamond-Bearing Ores. Bulletin of IrSTU. 2015; 4: 128–133. (in Russ.).
4. King R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann, 2017: 404.
5. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., Fedorov E.V. Radiometric sorting of ore in uranium leaching. Eurasian Mining. 2025; 1: 91-94. https://doi.org/10.17580/em.2025.01.18.
6. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., Miletenko N.A. Geological aspects of uranium deposits for in-situ leaching application to develop energy potential of Kazakhstan. Eurasian Mining. 2024; 2: 19–22. https://doi.org/10.17580/em.2024.02.04.
7. Tsoi S.V., Zhusupbekov S.S. Fundamentals of Development of Hydrogenetic Uranium Deposits. Almaty, 2016: 320. (in Russ.).
8. Oryngozhin E.S., Tsoi S.V., Bagasharova Zh.T., Oryngozha E.E. Critical Analysis of Existing Technology of Mining and Exploitation of Hydrogenetic Uranium Deposits. Bulletin of the NIS RK. 2018; 3: 42-47. (in Russ.).
9. Hubau A., Bru K., Oumarou S.I., Leycuras C. Lessons learned from the upscaling of an iron bio-oxidation process to improve uranium recovery. Comptes Rendus. Chimie, GDR Prométhée – French Research Network on Hydrometallurgical Processes for Primary and Secondary Resources. 2024; 27: 17-35. https://doi.org/10.5802/crchim.313.
10. Turysbekova G., Bektay Y., Altynbek A., Sidikanov M. Influence of iron-oxidizing bacteria on the redox potential of the leaching solution in situ recovery (ISR) of uranium. Conference: 22nd SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference 2022. 2022; 22 (6.2): 211-218. https://doi.org/10.5593/sgem2022V/6.2/s25.27v.
11. Golik V.I. Analysis of the completeness of uranium heap leaching. Mine Surveying and Subsurface Use. 2017; 3 (89): 24-33. (in Russ.).
12. Rasskazov I.Y., Sekisov A.G., Rasskazova A.V. In-situ leaching of molybdenum and uranium by percarbonate and chloride-hypochlorite solutions. Journal of Mining Institute. 2022; 256: 623-631. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.60.
13. Oryngozhin E.S., Bishimbaeva G.K., Oryngozha E.E. Development of Fundamentals of Innovative Technology for Exploitation of Hydrogenetic Uranium Deposits. Int. Conference "Key Problems of Modern Science", Bulgaria. 2019: 3-6. (in Russ.).
14. Shemyakin S.A., Shishkin E.A. A physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine tooth. Journal of the Mining Institute. 2021; 251: 639–647. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3.
15. Oryngozhin E.S., Bishimbaeva G.K., Metaksa G.P., Alisheva Zh.N., Oryngozha E.E. Application of underground leaching of uranium at the Semizbay deposit. Int. scientific-practical. conf. "Actual problems of the uranium industry", Almaty: JSC "NAC" Kazatomprom". 2019: 98-104. (in Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ерназ Советович Орынгожин –
доктор технических наук, КазНУ им. Аль-Фараби, ГНС ИГД им. Д.А. Кунаева, г. Алматы, Республика Казахстан; https://orcid.org/0000-0002-9452-6817

Ренат Асылбекович Юсубалиев –
соискатель, Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан; https://orcid.org/0000-0001-8993-9986

Ералы Ерназулы Орынгожа –
докторант PhD, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан; https://orcid.org/0000-0003-1493-4210; e-mail: ye.oryngozha@aues.kz

Инна Михайловна Малахова –
младший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Yernaz S. Oryngozhin –
Dr. Sci. (Eng.), Al-Farabi Kazakh National University, Chief Researcher at the Institute of Mining named after D.A. Kunaev, Almaty, Republic of Kazakhstan; https://orcid.org/0000-0002-9452-6817

Renat A. Yusubaliev –
Surveyor, National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan; https://orcid.org/0000-0001-8993-9986

Yeraly Ye. Oryngozha –
PhD doctoral student, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan; https://orcid.org/0000-0003-1493-4210; e-mail: ye.oryngozha@aues.kz

Inna M. Malakhova –
Junior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N. V. Melnikov Russian Academy of Sciences, IPKON RAS, Moscow, Russian Federation

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 15.09.2026
Поступила после рецензирования: 04.10.2026
Принята к публикации: 08.10.2026

Contribution:
The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 15.09.2026
Revised: 04.10.2026
Accepted: 08.10.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 528.88:622.1
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-22-29

ORIGINAL ARTICLE
UDC 528.88:622.1

Технологии лазерного сканирования в комплексе маркшейдерского обеспечения открытых горных работ на золоторудном месторождении

К. Ю. Москаленко✉
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово, Российская Федерация
✉ *moskalenkoky@gmail.com*

Резюме. Приведены результаты исследований основных параметров добычи и применяемых систем разработки на золоторудном месторождении «К». Установлены горнотехнические условия, рельеф и геологическое строение участка, а также технология ведения открытых горных работ в суровых климатических условиях. Описана методика съемки фактического положения горных выработок с использованием различных систем лазерного сканирования: наземного (RIEGL VZ-4000), воздушного (DJI Matrice 350 RTK) и мобильного (GoSLAM). В соответствии с технологическим циклом описаны методы маркшейдерского обеспечения буровзрывных работ, включая высокоточное GNSS-позиционирование буровых станков и регламенты действий маркшейдерской службы при технических сбоях навигационных систем. Рассмотрена технология контроля параметров развала горной массы с использованием датчиков смещения и лазерных сканирующих систем. Результаты исследований могут быть использованы при выборе и дальнейшем внедрении систем лазерного сканирования в технологический цикл на открытых горных работах в целях повышения точности маркшейдерского учета добычи, а также минимизации потерь полезного ископаемого на месторождениях со сложной морфологией рудных тел.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, маркшейдерское обеспечение, лазерное сканирование, БПЛА, буровзрывные работы, ГНСС-мониторинг, открытые горные работы, КузГТУ

Благодарность: Автор выражает благодарность руководству месторождения «К» и кафедре маркшейдерского дела и геологии (МДиГ) КузГТУ за помощь в организации и проведении исследований.

Для цитирования: Москаленко К.Ю. Технологии лазерного сканирования в комплексе маркшейдерского обеспечения открытых горных работ на золоторудном месторождении. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 22-29. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-22-29.

Laser scanning technologies in the complex of mine surveying support for open-pit mining at a gold deposit

K. Yu. Moskalenko✉
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
✉ *moskalenkoky@gmail.com*

Abstract. The article presents the results of research describing the main production parameters and mining systems applied at the "K" gold deposit. The mining and technical conditions, topography, and geological structure of the site are established, along with the technology for open-pit mining in harsh climatic conditions. The methodology for surveying the actual position of mine workings using various laser scanning systems - terrestrial (RIEGL VZ-4000), aerial (DJI Matrice 350 RTK) and mobile (GoSLAM) - is described. In accordance with the technological cycle, methods for mine surveying support of drilling and blasting operations are detailed, including high-precision GNSS positioning of drilling rigs and the surveying department's protocols for technical failures of navigation systems. The technology for monitoring muck pile parameters using displacement sensors and laser scanning systems is considered. The research results can be applied to the selection and further implementation of laser scanning systems into the operational cycle of open-pit mining to improve the accuracy of mine survey production accounting, as well as to minimize mineral losses in deposits with complex ore body morphology.

© Москаленко К. Ю., 2026

Keywords: gold deposit, mine surveying support, laser scanning, UAV, drilling and blasting operations, GNSS monitoring, open-pit mining, KuzSTU

Acknowledgments: The author expresses gratitude to the management of the "K" deposit and the Department of Mine Surveying and Geology at KuzSTU for their assistance in organizing and conducting the research.

For citation: Moskalenko K.Yu. Laser scanning technologies in the complex of mine surveying support for open-pit mining at a gold deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (5): 22-29. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-22-29.

Введение

Золоторудное месторождение «К» было открыто в 1967 году в ходе проведения геолого-разведочных работ. Изучение с поверхности и на глубину выявленного золоторудного ореола проводилось в 1973–1976 годах. В результате поисковых работ выше ручья «К» было оконтурено три рудных тела. Геологоразведочные работы на месторождении были возобновлены в 2000 году, в результате которых выявлена мощная жильно-прожилковая зона с золоторудной минерализацией протяженностью более 3 км, разделенная на две рудные зоны по условиям залегания. По результатам оценочно-разведочных работ 2000–2004 годов месторождение «К» признано разведанным и подготовленным к отработке. Месторождение разрабатывается с 2008 года и по настоящее время.

Объект исследований

Месторождение «К» находится в районе, относящемся к малообжитым северным территориям. Основная часть населения занята в горной промышленности. Район месторождения относится к горно-таежной зоне с типичным среднегорным рельефом местности. Абсолютные отметки вершин находятся в пределах 800–1100 м. Относительные превышения водоразделов над днищами долин составляют 100–200 м, достигая 300 м. Склоны долин чаще пологие (до 20°), реже крутые (до 25–30°). Местность сильно задернована, нередко заболочена.

Климат района резко континентальный с суровой продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом. Минимальные зимние температуры достигают -61 °С, максимальные летние – +34 °С (июль). Среднегодовая температура составляет -5 °С. Количество дней со среднесуточной отрицательной температурой воздуха – 209. Снеговой покров появляется в конце сентября и полностью исчезает в середине июня. Мощность снежного покрова достигает местами 3,5 м, в среднем около 1,2 м. Глубина промерзания нарушенных горных пород: крупнообломочных – 3,3 м; глинистых – 2,8 м.

В рудовмещающей минерализованной зоне выделяются следующие основные разновидности динамометаморфических пород:

1) катаклазированные и милонитизированные пятнистые сланцы;

2) мусковитовые динамосланцы (кристаллические сланцы зон смятия) – обычно являются рудоносными породами;

3) тонкополосчатые бластомилониты – являются основным видом рудоносных образований.

Основными факторами, контролирующими размещение и морфологию рудных зон и тел, являются литологические и структурные. Генеральный дизъюнктив имеет криволинейную траекторию. Оруденение месторождения «К» относится к геолого-промышленному типу крупных минерализованных зон и принадлежит к группе плутоногенных месторождений золотокварцевой рудной формации миогеосинклиналей. По минеральному составу минеральное сырье месторождения относится к золото-арсенидо-малосульфидному типу. Основными породообразующими минералами являются кварц, мусковит, серицит и биотит.

Золоторудное месторождение «К» в соответствии с «Классификацией запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» по сложности геологического строения относится ко 2-й группе, а по степени изученности – к разведанным.

Цель исследований: внедрение высокоточного GNSS-позиционирования буровых станков для использования системы воздушного и мобильного лазерного сканирования в комплексе маркшейдерского обеспечения открытых горных работ на золоторудном месторождении.

Методика исследований

Золоторудное месторождение «К» представлено двумя рудными телами, каждое из которых разрабатывается отдельными участками. Месторождение «К» является крутонаклонным и распространяется на большую глубину, расположено в местности с большим перепадом отметок. Карьерное поле вскрывается внешними и внутренними капитальными траншеями по комбинированной схеме с целью сосредоточения грузопотоков породы и полезного ископаемого по направлениям. Применяется как спиральная форма наклонных транспортных берм, так и петлевая форма трассы в местах примыкания участков транспортных берм. Подготовка горизонтов осуществляется котлованами. После подготовки горизонта он отрабатывается полностью до границ промежуточного или конечного контура карьера.

Для карьера «К» определено применение углубочной кольцевой центральной системы разработки с использованием автомобильного транспорта и размещением пустых пород во внешние отвалы. Высота уступов на вскрышных работах составляет 10–15 м, на очистных работах – 5–15 м в зависимости от горно-геологических условий. Углы откосов уступов приняты дифференцированно с учетом физико-механических свойств, гидрогеологии и тектонических условий залегания пород в массиве. Ограниченное пространство рабочей зоны в случае разноса временно нерабочего борта позволяет иметь в работе в среднем не более 3–4 уступов. При этом залегание рудного тела характеризуется постоянным сокращением фронта горных работ с увеличением глубины карьера. В таких условиях весьма важное значение приобретают вопросы правильного выбора направления расконсервации временных бортов, четкой организации и планирования работ.

В карьере «К» в зависимости от крепости, трещиноватости и прочих параметров все горные породы распределены на категории по взрываемости. Для взрывания скважин в условиях карьера «К» применяются эмульсионные взрывчатые

вещества. Для досыпки (в случае частичного ухода эмульсионных ВВ на участках повышенной трещиноватости) используются штатный гранулотол и граммонит.

Выбор ВВ осуществляется исходя из физико-механических свойств горных пород взрываемого массива, безопасности применения, степени обводненности скважин, а также длительности заряжания. В качестве бурового оборудования были приняты буровые станки СБШ-250, СБШ-215, DML. В качестве выемочно-погрузочного оборудования – экскаваторы ЭКГ-18, WK-20, WK-35. В качестве транспортного оборудования – автосамосвалы фирмы Caterpillar: CAT-785 и CAT-793, 830-E. На отвалообразовании – бульдозеры Komatsu: D-475A, D-375A, WD-600; Shantui: SD90-C5, SD60-C5.

Основной объем вскрышных пород размещают во внешнем отвале в шесть ярусов высотой по 30 м. Обязательным условием, обеспечивающим устойчивость многоярусного отвала, является распределение по высоте и порядок складирования вскрышных пород в зависимости от физико-механических свойств, складируемых в отвал. Основание отвала имеет уклон 5–7° по ходу отсыпки.

Работы ведутся согласно паспорту отсыпки с поддержанием на разгрузочной площадке постоянного уклона (контруклона) не менее 3°, направленного в центр отвала. Автосамосвалы разгружаются в местах, предусмотренных паспортом, за призмой возможного обрушения. Вне призмы возможного обрушения по всей протяженности бровки отвала отсыпается предохранительный вал высотой не менее половины диаметра колеса наиболее крупного автосамосвала, ограничивающий движение горнотранспортной техники.

Результаты исследований

Топографо-геодезические исследования

На территории карьера «К» существуют следующие геодезические сети:

– пункты ГГС 2–3-го классов, созданные предприятиями Роскартографии;

– постоянно действующая базовая станция, созданная маркшейдерской службой.

Фактическое состояние топографо-геодезической изученности позволяет обеспечить выполнение маркшейдерских работ на перспективу с условием проведения периодического мониторинга состояния пунктов топографо-геодезической сети.

Для определения съемочных точек, а также разбивки рельефа, ситуации и строящихся объектов на карьере «К» была определена базовая точка БАЗА01. Конструкция точки выполнена в виде металлического тура, опирающегося на несущую строительную колонну 5-этажного здания административно-бытового корпуса. Фундаменты здания имеют заглубление 4,5 м и опираются на несжимаемое скальное основание, эксплуатация здания на момент определения координат точки БАЗА01 составляет более 20 лет. Расположение антенны, закрепленной на туре, удовлетворяет требованиям по беспрепятственному и помехоустойчивому прохождению радиосигналов. Базовая точка БАЗА01 является основой для определения координат на всей территории месторождения «К».

Геодезические работы выполнялись двухсистемными спутниковыми приемниками Trimble R7 (антенна которого постоянно закреплялась на туре точки БАЗА01) и приемником Trimble R8, который поочередно устанавливался на пункты ГГС. Наблюдения выполнялись в режиме FastStatic с периодом наблюдений не менее 4 ч. Обработка полевых измерений производилась в программном обеспечении Trimble Business Center.

За основной масштаб съемки принят 1:1000 с сечением рельефа 1 м. Исходными пунктами являлись доступные пункты государственной геодезической сети (ГГС), располагавшиеся по периметру промышленных площадок карьера «К». Производство маркшейдерских работ на территории карьера «К» и ведение маркшейдерской графической документации осуществляются при использовании единой местной системы координат, имеющей ключи (параметры) перехода к геодезической системе координат 2011 года. Места установки пунктов опорной маркшейдерской сети должны быть легкодоступны, хорошо опознаваться на местности и обеспечивать долговременную сохранность центров и знаков. Пункты на местности должны выбираться с учетом возможности использования их в качестве точек съемочной сети (рис. 1). Допускается в качестве пунктов опорной маркшейдерской сети использование местных предметов ситуации (сваи, опоры ЛЭП и т. д.).

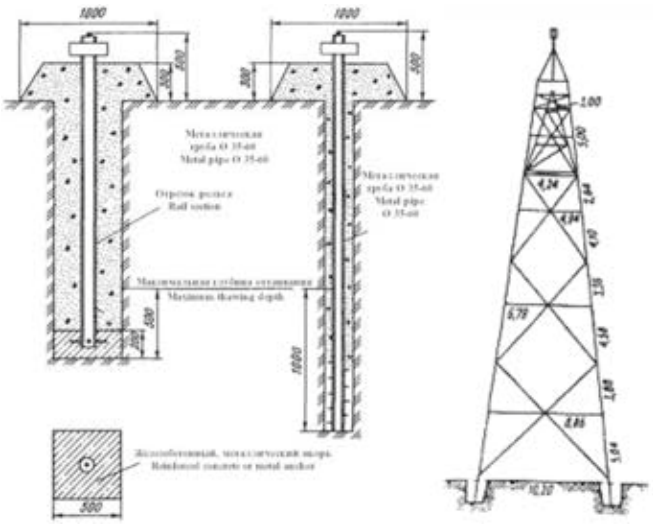


Рис. 1. **Типы знаков для закрепления пунктов опорной маркшейдерской сети на территории карьера «К» /**
Fig. 1. **Types of monuments for securing mine survey control network stations within the "K" open-pit min**

Пункты съемочных сетей закрепляются на местности знаками, обеспечивающими долговременную сохранность пунктов, и временными знаками с расчетом на сохранность точек на время съемочных работ. Во всех случаях знаки долговременного типа устанавливаются в местах, обеспечивающих их сохранность, технику безопасности и удобство использования при маркшейдерской съемке, изысканиях и строительстве, а также последующей эксплуатации. Временными знаками могут служить железные трубы (уголковая сталь), забитые в грунт на 0,5–1,0 м, с установленными рядом сторожками. Знаки планового обоснования маркируются порядковыми номерами с расчетом, чтобы на объекте не было дублирования. При включении в ход (сеть) знаков ранее произведенных съемок не разрешается менять ранее присвоенные им номера. На постоянных и временных знаках масляной краской пишут сокращенное название организации, проводящей работу, номер закрепленного пункта (точки) и год установки зна-

ка. Столбы и сторожки устанавливаются надписью к реперу или центру.

Организация и технология маркшейдерских работ на объектах открытых горных работ

Съемка фактического положения горных выработок

Основной задачей маркшейдерской службы является оперативная актуализация планов горных работ. Съемка бортов карьера, рабочих площадок и транспортных берм выполняется комбинированным методом с приоритетным использованием технологий лазерного сканирования, что позволяет повысить точность измерений и сократить время полевых работ в 10–20 раз по сравнению с тахеометрией [1–2].

Наземное лазерное сканирование (НЛС) используется избирательно для детальной съемки труднодоступных участков или зон с высоким риском обрушения [3].

Применяется сканер RIEGL VZ-4000 (рис. 2). Он работает на импульсном методе (ToF), что эффективно для больших дистанций (до 4 км) и глубоких карьеров с высотой бортов более 300 м. Для исключения мертвых зон за перегибами рельефа съемка ведется с нескольких позиций с перекрытием не менее 20–30 % [4–7].



Рис. 2. **Наземный лазерный сканер RIEGL VZ-4000 /**
Fig. 2. **RIEGL VZ-4000 terrestrial laser scanner**

Обработка результатов измерений производится в программе RiSCAN PRO (рис. 3). В данной программе осуществляется управление сканером, создание первичного облака точек и преобразование координат из WGS-84 в местную систему координат.

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) – основной метод оперативного получения данных о геометрии всего карьерного пространства. Несмотря на высокую производительность, применение ВЛС ограничено метеоусловиями (отсутствие сильного ветра, осадков и облачности), что делает невозможным его использование в «нелетную» погоду [8–9].

Используется беспилотный летательный аппарат DJI Matrice 350 RTK (рис. 4). Лидар регистрирует до 5–7 отражений на один импульс, что позволяет «прошивать» растительность и строить точные модели рельефа (DTM). Охват территории за один вылет составляет 150–500 га [10].

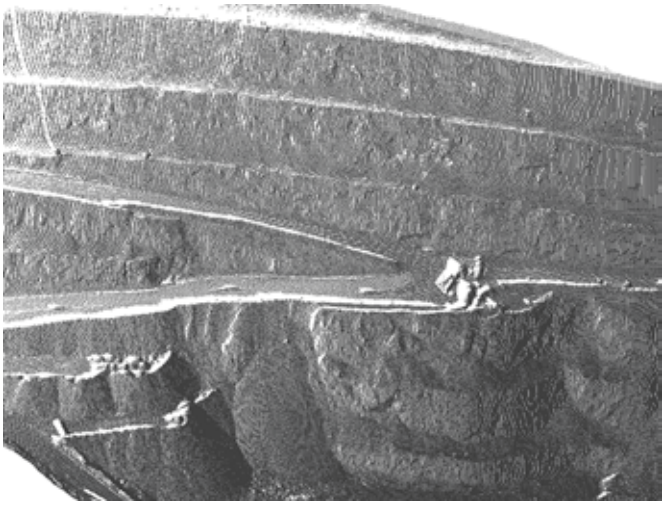


Рис. 3. **Визуализация облака точек, полученного с помощью системы наземного лазерного сканирования RIEGL VZ-4000 /**
Fig. 3. **Visualization of the point cloud acquired with the RIEGL VZ-4000 terrestrial laser scanning system**



Рис. 4. **Беспилотный летательный аппарат DJI MATRICE 350 RTK /**
Fig. 4. **DJI MATRICE 350 RTK unmanned aerial vehicle**

Обработка результатов измерений производится в программном обеспечении DJI Terra (рис. 5). Программа позволяет формировать облако точек с заданным параметром прореживания, создавать высокодетальные ортофотопланы и каркасные модели по облаку точек. Программное обеспечение отличается качественной визуализацией и позволяет оперативно определять отметку подошвы экскаваторов, а также фактический уклон съездов.

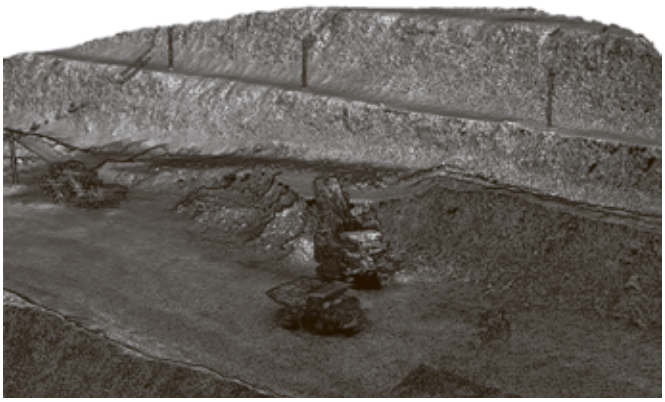


Рис. 5. **Визуализация облака точек, полученного с помощью системы воздушного лазерного сканирования DJI MATRICE 350 RTK /**
Fig. 5. **Visualization of the point cloud acquired with the DJI MATRICE 350 RTK airborne laser scanning system**

Мобильное лазерное сканирование (МЛС) выступает в качестве альтернативы ВЛС при неблагоприятных погодных условиях. Применение МЛС для съемки фактического положения горных выработок характеризуется высокой производительностью и снижением трудоемкости полевых работ по сравнению с наземным лазерным сканированием (НЛС). Благодаря исключению этапов развертывания системы на станциях и возможности непрерывного сбора данных в движении метод МЛС позволяет существенно сократить временные затраты на проведение съемки [11–13].

Применяется система GoSLAM RS100S (рис. 6) на базе технологии SLAM и алгоритмов графовой оптимизации (Pose Graph Optimization), что позволяет исключить искажения траектории при обнаружении «петли». Плотность данных достигает 993 точки/м² при уровне шума 0,029 м. Это обеспечивает 100-процентный охват объекта в зоне прямой видимости без остановки движения.



Рис. 6. **Мобильный лазерный сканер GoSLAM RS100S /**
Fig. 6. **GoSLAM RS100S mobile laser scanner**

Для обработки результатов измерений используется программное обеспечение GoSlam LidarWorks (рис. 7). В программу загружается первичное облако точек, сформированное сканером, после чего производится обработка облака: фильтрация (удаление шумов), прореживание облака точек и преобразование координат.



Рис. 7. **Визуализация облака точек, полученного с помощью системы мобильного лазерного сканирования GoSLAM RS100S /**
Fig. 7. **Visualization of the point cloud acquired with the GoSLAM RS100S mobile laser scanning system**

GNSS-приемники применяются для оперативного контроля высотных отметок капитальных и временных съездов, подошвы экскаваторных забоев и бровок уступов в режиме реального времени, а также выноса в натуру проектных контуров.

Используются многочастотные GNSS-приемники Trimble R12i. Модель оснащена технологией Trimble TIP на базе инерциальной системы (IMU), которая позволяет выполнять измерения с наклоненной вехой. Маркшейдер может производить съемку, не устанавливая веху строго вертикально, что повышает безопасность и скорость работ.

Управление процессом осуществляется через программное обеспечение Trimble Access, которое в режиме реального времени визуализирует результаты съемки на контроллере и позволяет маркшейдеру оперативно решать геодезические задачи непосредственно в поле. Функционал ПО обеспечивает высокоточный вынос проектных точек и контуров в натуру с непрерывным мониторингом среднеквадратической погрешности (СКО) в режиме RTK.

Маркшейдерское обеспечение отвалообразования и контроля динамики запасов на складах

Маркшейдерский контроль охватывает не только выемочно-погрузочные работы, но и процессы отвалообразования. Съемка фактического положения внешних отвалов и рудных складов позволяет точно рассчитывать объемы размещенных вскрышных пород и текущие запасы полезного ископаемого.

Отвалы вскрышных пород

В рамках маркшейдерского обеспечения отвальных работ первоочередное внимание уделяется параметрам, определяющим устойчивость и безопасность массивов.

Мониторинг включает фиксацию следующих показателей:

– высоту предохранительных валов, высоту отвальных ярусов и общую высоту отвала;

– фактических углов откосов, соблюдения проектных контруклонов и параметров берм;

– темпов продвижения фронта работ.

Использование систем мобильного (МЛС) и воздушного (ВЛС) лазерного сканирования позволяет оперативно выявлять отклонения от проектных контуров.

Склады полезного ископаемого

Съемка фактического положения складов полезного ископаемого производится после завершения формирования штабеля и перед началом отгрузки на ЗИФ. Если обнаружены изменения в форме или объеме склада во время погрузочно-разгрузочных работ, производится внеплановая съемка для обновления горно-графической документации.

Для определения объема полезного ископаемого на складах маркшейдерская служба преимущественно использует системы мобильного и воздушного лазерного сканирования, они позволяют зафиксировать мелкие детали рельефа штабеля. Наземное лазерное сканирование не используется для данного вида работ, поскольку требует больших временных затрат на съемку с разных точек стояния.

Подсчет объемов производят, используя метод вертикальных сечений в программном обеспечении K-mine.

Маркшейдерское сопровождение буровзрывных работ

На месторождении «К» особое внимание уделяется буровзрывным работам, поскольку этот этап оказывает непо-

средственное влияние на качество дробления горной массы. На предприятии применяется высокоточное позиционирование буровых станков, они самостоятельно ориентируются на буровзрывном блоке при помощи GNSS-приемников, установленных на борту, обеспечивая точность позиционирования до 8 мм в плане.

Несмотря на автоматизацию процессов позиционирования, сохраняются внештатные ситуации, требующие непосредственного участия маркшейдеров. При возникновении таких ситуаций маркшейдеры производят инструментальный вынос устьев скважин при помощи GNSS-приемников. Это необходимо для соблюдения параметров сетки БВР, установленных в паспорте на бурение.

После завершения бурения маркшейдеры фиксируют фактическое положение устьев скважин для подготовки исполнительной съемки обуренного блока. Эти данные требуются для проверки параметров бурения на соответствие паспорту БВР.

Также в обязанности маркшейдерского отдела входит съемка развала горной массы:

1. В соответствии с проектом в специально пробуренные скважины закладываются датчики смещений. Маркшейдеры инструментально фиксируют координаты устьев скважин, а также глубину закладки датчиков.

2. Перед взрывом проводится лазерное сканирование подготовленного блока для формирования цифровой модели поверхности (рис. 8).

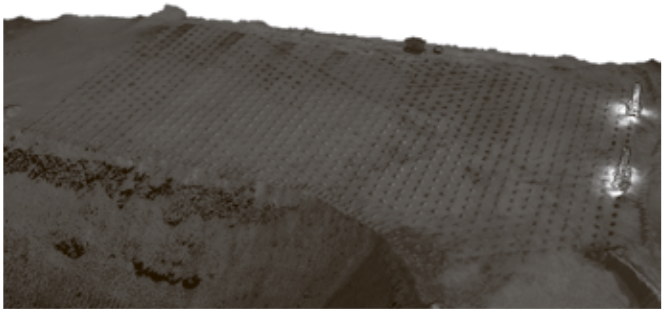


Рис. 8. **Визуализация облака точек подготовленного блока /**
Fig. 8. **Visualization of the point cloud of the prepared block**

3. После взрыва проводится повторная съемка поверхности сформировавшегося развала горной массы (рис. 9).

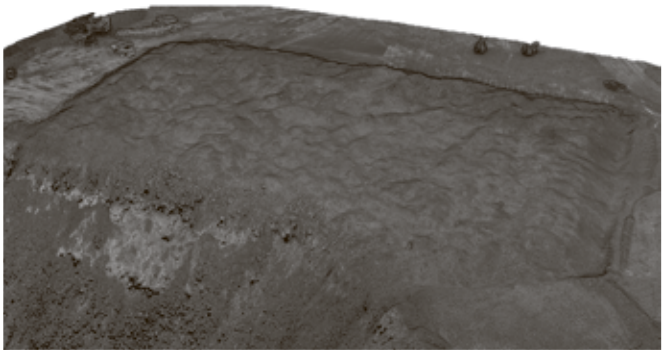


Рис. 9. **Визуализация облака точек сформировавшегося развала горной массы после взрыва /**
Fig. 9. **Visualization of the point cloud of the blasted rock muckpile**

4. Маркшейдеры производят поиск датчиков смещений при помощи специального прибора. Прибор определяет плановое положение и глубину залегания датчика под слоем взорванной горной массы.

Точная информация по перемещению рудных контуров после взрыва позволяет осуществлять контроль за содержанием полезного компонента в горной породе с целью извлечения всего запланированного объема полезных компонентов [14–15].

Заключение

1. Опыт эксплуатации показал, что системы воздушного и мобильного лазерного сканирования используются гораздо чаще наземного, поскольку точки стояния не всегда позволяют обеспечить прямую видимость на весь участок работ. Однако воздушное лазерное сканирование является наиболее эффективным методом, поскольку исключает присутствие персонала в рабочей зоне и требует минимальных временных затрат. В условиях сурового климата мобильное лазерное сканирование становится незаменимым при сильном ветре и большом количестве осадков. При этом наземное лазерное сканирование применяется для съемки больших по площади территорий при условии обеспечения прямой видимости на объект. Поэтому выбор системы лазерного сканирования должен быть гибким и зависеть от конкретных условий и задач.

2. Внедрение высокоточного GNSS-позиционирования буровых станков позволило уменьшить влияние человеческого фактора при выносе проектных скважин, обеспечив плановую точность наведения до 8 мм. Наличие алгоритмов взаимодействия маркшейдерской службы в случае сбоев высокоточного позиционирования является важным фактором для ведения горных работ без простоев.

3. Использование систем лазерного сканирования для съемки рудных штабелей и отвалов обеспечивает детализированный учет микрорельефа поверхностей. Это, в свою очередь, повышает достоверность контроля запасов руды и объемов вскрыши. В результате удалось добиться высокой точности подсчета объемов за счет сравнительного анализа цифровых моделей поверхностей.

4. Применение лазерного сканирования в комплексе с датчиками смещения повышает точность отработки золоторудных зон. Данные о перемещении рудных контуров после взрыва позволяют минимизировать потери полезного ископаемого. Внедрение подобных алгоритмов контроля является важным для месторождений со сложной морфологией рудных тел, поскольку это влияет на достоверность оперативного учета добычи.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований основных параметров добычи и применяемых систем разработки на золоторудном месторождении «К» в суровых климатических условиях. Описана методика комплексного применения наземных (RIEGL VZ-4000), воздушных (DJI Matrice 350 RTK) и мобильных (GoSLAM) лазерных сканирующих систем в зависимости от конкретных условий и задач. Обоснован выбор программного обеспечения (RiSCAN PRO, DJI Terra, GoSlam LidarWorks) для обработки результатов измерений каждого типа сканирующих систем. Описаны этапы создания первичных облаков точек, их дальнейшей фильтрации и преобразования координат в единую местную систему координат. Такой подход позволил интегрировать данные с

различных типов лазерных сканирующих систем для пополнения горно-графической документации и построения цифровых моделей поверхности (ЦМП).

2. Результаты исследований могут быть использованы при выборе и дальнейшем внедрении систем лазерного сканирования в технологический цикл на открытых горных работах в целях повышения точности маркшейдерского учета добычи, а также минимизации потерь полезного ископаемого на месторождениях со сложной морфологией рудных тел.

3. Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением сравнительного анализа точности и плотности облаков точек, полученных с различных типов систем лазерного сканирования с целью оценки погрешности построения цифровой модели поверхности (ЦМП). Это позволит разработать единую методику комплексного маркшейдерского обеспечения открытых горных работ, объединяющую возможности наземного, воздушного и мобильного лазерного сканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Правдина Е.А. Применение лазерно-сканирующих технологий при маркшейдерском обеспечении горных работ на карьерах. *Записки Горного института.* 2007; 173: 68-70.
   Pravdina E.A. Application of laser scanning technologies in mine surveying support of open-pit mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2007; 173: 68-70. (In Russ.).
2. Охотин А.Л. Применение лазерного сканирования в маркшейдерии. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2009; 1 (1): 270-278.
   Okhotin A.L. Application of laser scanning in mine surveying. *Interexpo Geo-Siberia.* 2009; 1 (1): 270-278. (In Russ.).
3. Кучинская Г., Ставская М. Применение наземного лазерного сканирования в современных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; 1: 160-169. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-160-169.
   Kuchinskaya G., Stavskaya M. Application of terrestrial laser scanning in modern conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2021; (1): 160-169 (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-160-169.
4. Комиссаров А.В. Обоснование направлений использования данных цифровой съемки при наземном лазерном сканировании. *Вестник СГУГиТ*. 2016; 1 (33): 95-100.
   Komissarov A.V. Substantiation of directions for using digital imaging data in terrestrial laser scanning. *Vestnik SSUGT.* 2016; 1 (33): 95-100. (In Russ.).
5. Алтынцев М.А., Карпик П.А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования. *Вестник СГУГиТ*. 2020; 25 (2): 121-139. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139.
   Altyntsev M.A., Karpik P.A. Methodology for creating digital three-dimensional models of infrastructure facilities for oil and gas production complexes using terrestrial laser scanning. *Vestnik SSUGT.* 2020; 25 (2): 131-139. (In Russ.). https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139.
6. Бударова В.А., Мартынова Н.Г., Шереметинский А.В., Привалов А.В. Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений. *Московский экономический журнал*. 2019; 6: 8-14. https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-16004.
   Budarova V.A., Martynova N.G., Sheremetinskiy A.V., Privalov A.V. Terrestrial laser scanning of industrial site objects on the territory of oil and gas field. *Moscow Economic Journal.* 2019; 6: 8-14. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-16004.
7. Новоселов Д.Б. Применение наземных лазерных сканеров при геодезическом сопровождении строительства горнодобывающих промышленных предприятий. *Интерэкспо Гео-Сибирь.* 2022; 1 (2): 104-112. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-1-104-112.
   Novoselov D.B. Application of terrestrial laser scanners in the geodetic support of the construction of mining industrial enterprises. *Interexpo Geo-Siberia.* 2022; 1 (2): 272-277. (In Russ.). https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-1-104-112.
8. Оника С.Г., Куликовская О.Е., Атаманенко Ю.Ю. Использование беспилотных летательных аппаратов для решения инженерных задач маркшейдерии и геодезии. *Горная механика и машиностроение*. 2018; 2: 15-21.
   Onika S.G., Kulikovskaya O.E., Atamanenko Y.Y. The use of unmanned aerial vehicles for solving engineering problems of mine surveying and geodesy. *Mining Mechanical Engineering and Machine-Building.* 2018; 2: 15-21. (In Russ.).
9. Кузнецов Г.А., Кудрявцев И.В., Крылов Е.Д. Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов. *Инженерный журнал*: *наука и инновации*. 2018; 9 (81): 1-22. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1801.
   Kuznetsov G.A., Kudryavtsev I.V., Krylov E.D. Retrospective analysis, current state and development trends of domestic unmanned aerial vehicles. *Engineering Journal: Science and Innovation.* 2018; 9 (81): 1-22. (In Russ.). https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1801.
10. Блищенко А.А. Использование геодезических приборов на открытых горных работах, тенденция применения беспилотных технологий. *Colloquium-journal*. 2020; 14-2 (66): 4-5. https://doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11902.
    Blishchenko A.A. The use of geodetic instruments in open-pit mining, the trend of using unmanned technologies. *Colloquium-journal.* 2020; 14-2 (66): 4-5. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11902.
11. Сарычев Д.С. Мобильное лазерное сканирование. *Дороги*. *Инновации в строительстве*. 2013; 1 (1): 37-41.
    Sarychev D.S. Mobile laser scanning. *Roads. Innovations in construction.* 2013; 1 (1): 37-41. (In Russ.).
12. Кузьмин Т.В., Васильев М.Д., Голубко Б.П. Наземное и мобильное лазерное сканирование в маркшейдерской съёмке при разработке месторождений открытым способом. *Уральская горная школа – регионам*: *мат-лы Межд. науч.-практ. конф., г. Екатеринбург, 6–7 апреля 2020 г.* Екатеринбург, 2020: 241-242.
    Kuzmin T.V., Vasiliev M.D., Golubko B.P. Terrestrial and mobile laser scanning in mine surveying during open-pit mining. *Ural Mining School to the Regions: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, April 6–7, 2020.* Yekaterinburg, 2020: 241-242. (In Russ.).
13. Писарев В.С., Ахмедов Б.Н., Басаргин А.А. Анализ способов сбора геоданных при геодезическом сопровождении горных работ. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019; 1 (1): 197-202. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-1-1-197-202.
    Pisarev V.S., Ahmedov B.N., Basargin A.A. Analysis of geodata collection methods for geodetic support of mining operations. *Interexpo Geo-Siberia.* 2019; 1 (1): 197-202. (In Russ.). https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-1-1-197-202.

14. Аленичев И.А., Рахманов Р.А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера. *Записки Горного института*. 2021; 249: 334-341. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2.
Alenichev I.A., Rakhmanov R.A. Investigation of empirical laws of rock mass displacement by blasting onto the free surface of a quarry bench. *Journal of Mining Institute.* 2021; 249: 334-341. (In Russ.). https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2.
15. Lucas R., Nies D. Improving fragmentation and ore displacement control. *Proceedings of the 16th Conference on Explosives and Blasting Technique*. 1990; 16: 409-422.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирилл Юрьевич Москаленко –
аспирант группы ГМа-251 кафедры маркшейдерского дела и геологии (МДиГ), Кузбасский государственный технический университет (КузГТУ) имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация;
e-mail: moskalenkoky@gmail.com

Информация о статье
Поступила в редакцию: 20.05.2026
Поступила после рецензирования: 15.08.2026
Принята к публикации: 24.08.2026

ABOUT THE AUTHORS

Kirill Yu. Moskalenko –
Postgraduate Student, Group GMa-251, Department of Mine Surveying and Geology, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation;
e-mail: moskalenkoky@gmail.com

Article info
Received: 20.05.2026
Revised: 15.08.2026
Accepted: 24.08.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 528.71.952
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-30-35

ORIGINAL ARTICLE
UDC 528.71.952

Разработка алгоритма моделирования месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем

А. А. Басаргин[1, 2]✉

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*
[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск, Российская Федерация*
✉ *abaspirant@mail.ru*

Резюме. Приведены результаты разработки алгоритма моделирования месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем с включением межклассовых зависимостей. Приведен анализ методов моделирования случайных полей цепи Маркова для создания трансиограмм, которые позволяют воспроизводить пространственную структуру месторождения полезных ископаемых. Обоснован подход для использования трансиограмм при моделировании крупномасштабной структуры месторождения полезных ископаемых и пространственно-временного анализа неопределенности дискретных пространственных переменных. Детально описан алгоритм моделирования месторождений полезных ископаемых для эффективного определения причинно-следственных связей и пространственных закономерностей качественных и количественных показателей залежи. Одним из преимуществ данного подхода является то, что смоделированные трансиограммы имеют тренд следовать экспериментальным. Результаты исследований могут быть полезными при определении пространственных характеристик залежи полезных ископаемых.

Ключевые слова: трансиограммы, цепи Маркова, кокригинг, матрица меток топологии, стохастическое моделирование

Благодарности, финансирование: Работа выполнена при поддержке темы «Разработка фундаментальных основ моделирования, автоматизации и роботизации процессов горного производства для обеспечения оптимального управления и устойчивого функционирования горнотехнических систем» при ИПКОН РАН.

Для цитирования: Басаргин А.А. Разработка алгоритма моделирования месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 30-35. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-30-35.

Development of an algorithm for modeling mineral deposits based on a spatial Markov chain with a fixed path

A. A. Basargin[1, 2]✉

[1]*Federal State Budgetary Institution of Science "Institute for Problems of Comprehensive Development of Subsoil Academician N.V. Melnikov" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[2]*Federal State Budgetary Institution of Higher Education "Siberian State University of Geosystems and Technologies", Novosibirsk, Russian Federation*
✉ *abaspirant@mail.ru*

Abstract. The article presents the results of developing an algorithm for modeling mineral deposits based on a spatial Markov chain with a fixed path and incorporating interclass dependencies. An analysis of Markov chain random field modeling methods for creating transiograms that allow for the reproduction of the spatial structure of a mineral deposit is presented. An approach for using transiograms in modeling the large-scale structure of a mineral deposit and for spatiotemporal uncertainty analysis of discrete spatial variables is substantiated. An algorithm for modeling mineral deposits for the efficient determination of cause-and-effect relationships and spatial patterns in the qualitative and quantitative parameters of a deposit is described in detail. One of the advantages of this approach is that the modeled transiograms tend to follow experimental data. The research results can be useful in determining the spatial characteristics of a mineral deposit.

© Басаргин А. А., 2026

Keywords: transiograms, Markov chains, cokriging, topology label matrix, stochastic modeling

Acknowledgments, financial support: The work was carried out with the support of the theme "Development of fundamental principles for modeling, automation and robotization of mining production processes to ensure optimal control and sustainable operation of mining engineering systems" at the IPKON RAN.

For citation: Basargin A.A. Development of an algorithm for modeling mineral deposits based on a spatial Markov chain with a fixed path. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 30-35. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-30-35.

Введение

В практике маркшейдерского мониторинга месторождений полезных ископаемых давно используются одномерные цепи Маркова (или вероятности перехода). При этом более ранние модели цепей Маркова не могли выполнять условное моделирование, и долгое время было сложно определить цепь Маркова наблюдаемыми данными.

Кроме того, условное моделирование должно выполняться с помощью подходов индикаторного кригинга, и при этом будет наблюдаться тенденция недооценивать малые классы из-за исключения нежелательных переходов, вызванных использованием нескольких цепей и полной независимости геопространственной информации, а также обусловленности точечных выборок.

Существующие геостатистические методы изначально применялись для моделирования минералов, которые не включали сильно коррелированные полиномиальные классы. При этом метод кокригинга широко использовался для включения вторичной информации в геостатистическое моделирование. Известно, что геостатистические методы кригинга могут быть применены для работы с геологическими переменными, и при моделировании приходится игнорировать межклассовые зависимости при корегионализации большого набора задействованных моделей. Таким образом, основные проблемы будут заключаться в трудностях включения межклассовых зависимостей и работы с большим количеством классов, существующих в категориальных геологических переменных.

Одним из решений данной проблемы будет являться алгоритм моделирования месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем. При моделировании месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем можно применить способ трансиограммы (то есть диаграммы вероятности перехода) для представления пространственных взаимозависимостей (то есть автокорреляций) между показателями залежи полезного ископаемого. Трансиограммы оцениваются по выборкам и подгоняются под модель для предоставления входных параметров для алгоритма моделирования [1].

Данный подход условного моделирования с помощью цепи Маркова показывает, что межклассовые зависимости могут быть легко и эффективно включены в моделирование сложных категориальных переменных через вероятности перехода. Чтобы модель цепи Маркова работала с данными выборочных точек, необходимо напрямую оценивать диаграммы вероятности перехода из выборочных разреженных точечных геологических данных. Трансиограммы не требуют марковского предположения первого порядка, которое необходимо при вычислении вероятностей многошагового перехода из вероятностей одношагового перехода.

Таким образом, трансиограммы будут служить пространственными мерами для геостатистики цепей Маркова, а модели цепей Маркова могут напрямую извлекать необходимые вероятности перехода с различными задержками из непрерывных моделей трансиограмм, подходящих к экспериментальным трансиограммам. Фактически использование трансиограмм вместо матриц вероятностей одношагового перехода имеет одно очевидное преимущество – во включении сложной пространственной вариации многочленных классов.

Цель исследований: разработка алгоритма моделирования месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем.

Объект исследований

В настоящее время на территории Республики Бурятии осуществляется добыча угля, золота (рудного и россыпного), нефрита, урана и сырья для производства строительных материалов. Кроме разрабатываемых месторождений, на стадии подготовки к освоению находятся месторождения полиметаллических руд, вольфрама и молибдена. В нераспределенном фонде недр имеются крупнейшие месторождения калийно-глиноземного сырья и особо чистого кварца, перспективные, но требующие доразведки либо переоценки в современных экономических условиях месторождения полиметаллов [2–5].

В целях вовлечения месторождений полезных ископаемых в хозяйственный оборот и обнаружения новых месторождений на территории Республики Бурятии проводятся работы по геологическому изучению и воспроизводству минерально-сырьевой базы. Так, среди осваиваемых месторождений находится разрез «Тугнуйский» – одно из крупнейших в России предприятий по добыче каменного угля. Здесь осуществляется разработка открытым способом Олонь-Шибирского каменноугольного месторождения, расположенного в Петровск-Забайкальском районе Забайкальского края, в Мухоршибирском районе Бурятии. Центральная часть месторождения находится в 90 км к юго-востоку от г. Улан-Удэ. Месторождение представлено 21 угольным пластом, из которых промышленное значение имеют четыре: № 6, 8, 15, 18. Основным рабочим пластом является пласт № 18 (64 % всех запасов). Глубина его залегания – от 3 до 169 м.

Материал и методы исследования

В данном исследовании разработка алгоритма моделирования месторождений полезных ископаемых проводилась на площади размером 4 × 1,7 км. Площадь месторождения полезных ископаемых была разбита в сетку 50 × 40 с размером пикселя 20 × 20 м.

Для моделирования использовались два набора данных. Первый набор данных выборки состоял из 236 точек (20 % от общего числа пикселей), а разреженный набор данных выборки – из 62 точек (6,6 % от общего числа пикселей) [6].

Пространственная цепь Маркова определяется как слу-

чайное поле, которое перемещается или «прыгает» в пространстве, подчиняясь разным (или тем же) правилам вероятности перехода в разных направлениях. При этом его состояние полностью меняется в зависимости от его ближайших известных соседей, найденных в разных направлениях.

Теория пространственной цепи Маркова дает общее решение для условного распределения вероятностей дискретной случайной величины Z в невыбранном местоположении u как:

$$P_r\big(Z(u)\big) = K(z(u_1) = l_1, \Lambda, Z(U_m) = l_m) = \\ = \frac{\prod_{i=2}^{m} P_{\mathrm{kl}}^{i}(h_i) P_{\mathrm{lk}}^{l}(h_1)}{\sum_{f=1}^{n} \left[\prod_{i=2}^{m} P_{\mathrm{kl}}^{i}(h_i) P_{\mathrm{lk}}^{l}(h_1)\right]} \quad (1)$$

где P^i – представляет вероятность перехода в i-м направлении;

u_l представляет соседа, из которого или через которого марковская цепь перемещается в текущее местоположение u;

m представляет количество ближайших известных соседей;

k, l_i и f – все представляют классы в пространстве состояний $S = (1, \ldots, n)$;

h_i – расстояние от текущего местоположения до ближайшего известного соседа u_i.

При увеличении лага h_i от нуля до определенного расстояния $P_{\mathrm{kl}}^{i}(h_i)$ цепь образует трансиограмму (непрерывную диаграмму вероятности перехода) из класса k в класс l_i в i-м направлении.

Если рассматривать только четыре ортогональных направления – 1, 2, 3 и 4, уравнение (1) выглядит как

$$P_r\big(Z(u)\big) = k | Z(U_1) = l,\ Z(U_2) = q,\ Z(U_3) = m, \\ Z(U_4) = o,\ | = \frac{P_{\mathrm{lk}}^{1}(h_1) P_{\mathrm{kq}}^{2}(h_2) P_{\mathrm{km}}^{3}(h_3) P_{\mathrm{ko}}^{4}(h_4)}{\sum_{f=1}^{n} P_{\mathrm{ik}}^{1}(h_1) P_{\mathrm{kq}}^{2}(h_2) P_{\mathrm{km}}^{3}(h_3) P_{\mathrm{ko}}^{4}(h_4)}, \quad (2)$$

где k – представляет состояние невыбранного местоположения, которое необходимо оценить, *a l, q, m* и *o* представляют состояния четырех ближайших известных соседей в соответствующих направлениях.

В данном случае степени 1, 2, 3 и 4 могут представлять направления влево, вправо, вверх и вниз соответственно в любой последовательности.

Уравнение (2) является основной моделью пространственной цепи Маркова, которое будет использоваться в разработке алгоритма.

Предположим, что для моделирования пространственного распределения n взаимоисключающих классов геологических данных будет обусловлено набором выборки в N узлах сетки. N классов могут быть в любой случайной последовательности, обозначенной как любые метки 1, 2, . . ., n или *A, B, C*, . . При этом выборка Монте-Карло используется для получения меток из кумулятивного условного распределения вероятностей для каждого узла.

Таким образом, моделирование месторождений полезных ископаемых на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем выполняется следующим образом (рис. 1) [7–11]:

1. Первым делом необходимо соединить периферийные наблюдаемые точки в исследуемой области. В результате получатся моделируемые линии, используя модели цепи Маркова, – в зависимости от количества ближайших известных соседей, найденных в ортогональных направлениях. Если эти моделируемые линии не накладываются на внешние границы исследуемой области, внешние границы можно представить путем создания условий.

2. Далее требуется соединить все пары точек наблюдаемых данных, которые не были соединены на первом этапе, в моделируемые линии, используя модель пространственной цепи Маркова, заданную в уравнении (2), следуя симметричному (или квазисимметричному) пути. Эти моделируемые линии образуют сеть, состоящую из множества ячеек с известными (уже моделируемыми) границами.

3. В итоге в каждой ячейке будет получено значение узла на основе четырех ближайших известных соседей, следуя симметричному (или квазисимметричному) пути.

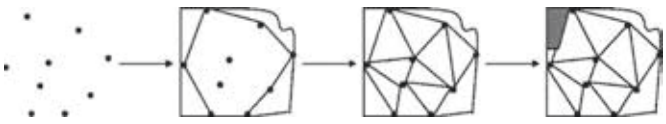


Рис. 1. **Иллюстрация процесса моделирования от создания сетки до ее заполнения /**
Fig. 1. **Illustrating the simulation process from netting to mesh-filling**

Результаты исследований и их обсуждение

В результате проведенных исследований были оценены экспериментальные трансиограммы по 216 точкам и подгонялись по экспоненциальным и сферическим моделям. Подогнанные модели трансиограмм использовались для моделирования с обоими наборами данных. При этом разреженный набор данных из 62 точек был слишком мал для оценки надежных экспериментальных трансиограмм. Если учитывать, что разреженный набор данных был мал, то частоты перехода в четырех ортогональных направлениях были объединены, чтобы получить только один набор экспериментальных трансиограмм.

Рисунок 2 иллюстрирует подмножество экспериментальных автокросс-трансиограмм, которые разделяют один и тот же головной класс и их подгоночные модели [12].

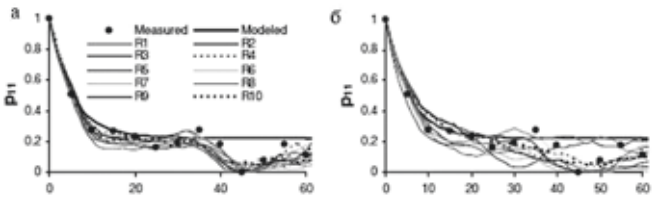


Рис. 2. **Подмножество экспериментальных автокросс-трансиограмм: а – экспериментальная трансиограмма p(h), смоделирована уравнением (2); б – трансиограммы, основанные на стационарном марковском предположении первого порядка /**
Fig. 2. **Subset of experimental autocross-transiograms: a – experimental transiogram p(h), modeled by equation (2); b – transiograms based on the first-order stationary Markov assumption**

Анализ исследований показал, что большинство этих экспериментальных трансиограмм можно «подогнать» с помощью экспоненциальной или сферической модели. При этом доля соответствующего хвостового класса служит порогом модели. На рисунке 2а экспериментальная трансиограмма *p(h)*, смоделирована уравнением (2), имеет очевидные колебания. Это может быть вызвано недостаточностью наблюда-

емых данных и не марковским эффектом реальных данных. При этом трансиограммы, основанные на стационарном марковском предположении первого порядка, являются гладкими кривыми (рис. 2б). Это означает, что только часть особенностей экспериментальных трансиограмм зависят от сложности используемых математических моделей, а анизотропия и направленная асимметрия может охватывать больше деталей при моделировании месторождений полезных ископаемых.

В результате для каждого набора исходных геологических данных было смоделировано 50 вариантов на основе пространственной цепи Маркова с фиксированным путем. Карты прогноза геологического распределения качественного показателя месторождения полезного ископаемого были оценены для каждого набора смоделированных реализаций. На основе карты максимальной вероятности прогноза появления качественного показателя месторождения полезного ископаемого для соответствующего набора данных была сгенерирована оптимальная карта прогнозирования, представленная на рисунке 3.



Рис. 3. **Карта прогнозирования показателей залежи /**
Fig. 3. **Deposit indicator forecast map**

Данная карта прогнозирования также представляет собой оптимально интерполированный результат разреженного набора данных выборки [13–15]. В результате видно, что все семь классов геологических данных хорошо охвачены. Небольшие классы данных, такие как класс 2 и класс 4, хорошо получены, даже с разреженным набором, в зависимости от их корреляционных связей. Одной из значимых характеристик смоделированных реализаций является то, что крупномасштабные образцы геологических данных генерируются как полигоны, а не фрагментарные пиксели, как в обычных геостатистических методах.

В результате анализа получено, что модели, основанные на одном и том же наборе данных, показывают похожие закономерности. Это значит, что включение межклассовых отношений (то есть кросс-корреляций) среди различных классов данных зависит от нелинейности пространственной цепи Маркова с фиксированным путем.

Карты вероятности появления отдельных классов геологических данных отображаются на рисунке 4 соответственно для плотного набора и разреженного набора. Карты четко показывают, где и с какой вероятностью класс имеет тенденцию встречаться в исследуемой области. Темная область на карте вероятности появления означает, что класс имеет высокую вероятность встречаться в этом месте как полигон.

Неглубокие серые полосы на двух картах максимальной вероятности появления указывают на переходные зоны, которые подразумевают приблизительные местоположения границ классов и неопределенность местоположения границ.

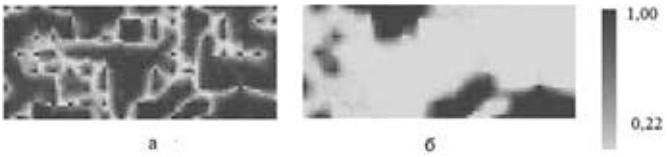


Рис. 4. **Карта вероятности появления отдельных классов:**
а – для плотного набора; б – для разреженного набора /
Fig. 4. **Map of the probability of occurrence of individual classes:**
a – for a dense set; b – for a sparse set

Постепенный переход от темного цвета к фоновому цвету подразумевает локальную неопределенность границы полигона. Таким образом, карты максимальной вероятности появления признака указывают на надежность соответствующих карт прогнозирования, то есть где прогнозируемый результат имеет более низкое качество, а где он имеет более высокое качество. В частности, переходные зоны (или неопределенные границы) между различными классами могут быть выявлены на карте максимальной вероятности появления.

Заключение

1. В статье представлен простой и эффективный алгоритм цепи Маркова с фиксированным путем для стохастического моделирования, обусловленный точечными выборками. Данный алгоритм позволит определить влияние интеграции неопределенных вторичных данных в процедуру моделирования ресурсов с использованием различных стратегий. Таким образом, в отличие от традиционных подходов данный алгоритм будет интегрировать неопределенность, присутствующую во вторичных данных, в результирующие модели месторождения полезного ископаемого.

2. Установлено, что данный алгоритм предоставляет явное решение для функции условной вероятности неизвестного местоположения с различными структурами ближайшего известного соседа, но с очевидной локационной неопределенностью, отраженной в картах вероятности появления.

3. Выявлено, что алгоритм цепи Маркова с фиксированным путем хорошо подходит для анализа пространственной неопределенности полиномиальных классов путем генерации большого количества реализаций и оценки карт вероятности появления. Использование моделей трансиограмм для предоставления вероятностей перехода при любых задержках представляет собой преимущество алгоритма для включения сложных особенностей пространственных вариаций дискретных переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Басаргин А.А. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий. *Вестник СГГА*. 2014; 1 (25): 34-40.
Basargin A.A. Creation of digital models of mineral deposits using modern technologies. *Bulletin of the SSGA.* 2014; 1 (25): 34-40 (In Russ.).
2. Басаргин А.А. Методика создания трехмерных геологических моделей месторождений с использованием геоинформационной

системы Micromine. *Сборник материалов Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2015»: Т. 1: Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия.* Новосибирск, 2015: 15-20.
Basargin A.A. Methodology for creating three-dimensional geological models of deposits using the Micromine geographic information system. *Collection of materials international. Scientific congr. "GEO-Siberia-2015". T. 1 "Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying".* Novosibirsk, 2015:15-20. (In Russ.).
3. Урумов В.А., Босиков И.И. 3D-модель и закономерности распределения полезных компонентов залежи Анненская Жезказганского месторождения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2015; 7 (1): 11-16.
Urumov V.A., Bosikov I.I. 3D model and patterns of distribution of useful components of the Annenskaya deposit of the Zhezkazgan deposit. *Sustainable development of mountain territories.* 2015; 7 (1): 11-16. (In Russ.).
4. Шульга Е.С. Чем порадует 2018 год пользователей программы Micromine. *Золото и технологии.* 2017; 4 (38): 50-53.
Shulga E.S. What will 2018 please users of the Micromine program. *Gold and Technologies.* 2017; 4 (38): 50-53. (In Russ.).
5. Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID-моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна. *Записки Горного института*. 2023; 262: 562-570.
Vystrchil M.G., Gusev V.N., Sukhov A.K. A method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Journal of Mining Institute.* 2023; 262: 562-570. (In Russ.).
6. Шевкун Е.Б., Лещинский А.В., Галимьянов А.А. Короткая комбинированная забойка взрывных скважин высокой запирающей способности. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015; 4: 331-336.
Shevkun E.B., Leshchinsky A.V., Galimyanov A.A. Short combined driving of blast holes with high locking ability. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2015; 4: 331-336. (In Russ.).
7. Долгачева А.С., Долгачева Т.А., Самаевская В.Д. Методы интерполяции в Vertical mapper для создания цифровых моделей рельефа. *Огарёв-Online*. 2023; 187 (2): 10.
Dolgacheva A.S., Dolgacheva T.A., Samayevskaya V.D. Interpolation methods in vertical mapper to create digital terrain models. *Ogarov-Online.* 2023; 2 (187): 10. (In Russ.).
8. Нурмухаметова А.Т. 3-х мерное моделирование при подсчете объемов полезного ископаемого. *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина*. Томск, 2017: 582-583.
Nurmukhametova A.T. 3-Dimensional Modeling in Calculating Mineral Resources Volumes. *Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XXI International Symposium named after Academician M.A. Usov for Students and Young Scientists Dedicated to the 130-th Anniversary of Professor M.I. Kuchin.* Tomsk, 2017: 582-583.
9. Бесимбаева О.Г., Хмырова Е.Н., Бедарев А.С. и др. Исследование возможности 3D-моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. мат-лов в 2 т. (Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.)*. Новосибирск, 2014; 2: 178-183.
Besimbaeva O.G., Khmyrova E.N., Bedarev A.S. et al. Study of the possibility of 3D modeling for surveying support for mining operation. *Interexpo GEO-Siberia-2014. X International scientific congr.: Int. scientific conf. "Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying": collection. materials in 2 vol. (Novosibirsk, April 8-18, 2014).* Novosibirsk, 2014: 178-83. (In Russ.).
10. Уорсли Дж., Дрейф Дж. PostgreSQL для профессионалов. Санкт-Петербург, 2003: 496.
Worsley J., Drake J. PostgreSQL for professionals.тSt. Petersburg, 2003: 496. (In Russ.).
11. Дроздов А.Ю. Решение задач сетевого анализа с применением PostgreSQL. *PostGIS. Строительство и архитектура – 2015. Современные информационно-экономические технологии: тенденции и перспективы развития: мат-лы Межд. науч.-практ. конф*. Ростов-на-Дону, 2015: 71-72.
Drozdov A.Yu. Solving network analysis problems using PostgreSQL. *PostGIS. "Construction and Architecture – 2015". Modern information and economic technologies: trends and development prospects: Materials of the International Scientific and Practical Conference.* Rostov on Don, 2015: 71-72. (In Russ.).
12. Вальков В.А., Валькова Е.О., Мустафин М.Г. Методика уточнения цифровых моделей n рельефа открытых горных выработок по материалам лазерного сканирования и аэрофотосъемки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 3 (125): 40-52. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_3_40_52.
Valkov V.A., Valkova E.O., Mustafin M.G. Methodology of refining digital models of the relief of open-cut mine workings based on the materials of laser scanning and aerial photography. *Mine surveying and subsurface use.* 2023; 3 (125): 40-52. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_3_40_52.
13. Пашковская О.В., Новоселов О.В., Потапенко И.А. Анализ данных в геоинформационной системе QGIS. *Решетневские чтения: мат-лы XXIV Межд. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (10–13 нояб. 2020, г. Красноярск): в 2 ч*. Красноярск, 2020; 2: 345-346.
Pashkovskaya O.V., Novoselov O.V., Potapenko I.A. Data analysis in the geoinformation system QGIS. *Reshetnev Readings: materials of the XXIV International. scientific-practical conf., dedicated in memory of the general designer of rocket and space systems, academician M. F. Reshetnev (November 10–13, 2020, Krasnoyarsk): at 2 o'clock - Siberian State University named after. M. F. Reshetneva.* Krasnoyarsk, 2020; 2: 345-6. (In Russ.).
14. Кравцова В.И., Другов М.Д. Типы динамики дюнного рельефа Анапской пересыпи: исследование по материалам воздушного лазерного сканирования. *Геодезия и картография*. 2019; 2: 32-45. https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-944-2-32-45.
Kravtsova V.I., Drugov M.D. Types of dune terrain dynamics of Anapa bay bar: research based on airborne LIDAR data. *Geodesy and cartography.* 2019; 80 (2): 32-45. (In Russ.). https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-944-2-32-45.
15. Хританькова А.А., Ковальчик Н.В. Сравнение возможностей программных средств ArcGis и QGIS для сетевого анализа в сфере транспортной логистики (на примере г. Минска). *ГИС-технологии в науках о Земле: мат-лы республ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых*. Минск, 2020: 9-13.
Khritankova A.A., Kovalchik N.V. Comparison of the capabilities of ArcGis and QGIS software for network analysis in the field of transport logistics (using the example of Minsk). *GIS technologies in Earth sciences: materials of the republican scientific and practical seminar of students and young scientists.* Minsk, 2020: 9-13 (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Александрович Басаргин –
*старший научный сотрудник № 3.1 лаборатории геологоструктурного моделирования ИПКОН РАН, г. Москва, e-mail***:** *abaspirant@mail.ru;*
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск, Российская Федерация

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.06.2026
Поступила после рецензирования: 18.08.2026
Принята к публикации: 10.09.2026

ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Basargin –
Senior Researcher No. 3.1 Laboratory of Geological-Structural Modeling, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, e-mail: abaspirant@mail.ru;
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.06.2026
Поступила после рецензирования: 18.08.2026
Принята к публикации: 10.09.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.333:550.8:519.2
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-36-42

ORIGINAL ARTICLE
UDC 622.333:550.8:519.2

Определение параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта

Е. А. Тагаев✉
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ *tagaev.egor@mail.ru*

Резюме. Предложен методический подход к определению параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта на основе моделирования качественных показателей. Актуальность работы связана с тем, что среднепластовая оценка качества не позволяет надежно прогнозировать локальные интервалы ухудшения качества добываемой массы при сложном строении пласта. Подход апробирован на материале пласта Н16 Северо-Западного участка Эльгинского месторождения с выделением 3-й минерализованной пачки как самостоятельного геолого-технологического объекта. В расчетную выборку включено 115 скважин, для которых рассчитан показатель A_d100%, учитывающий полное засорение внутрипластовыми породными прослоями. По выборке A_d100% изменяется от 23,0 до 60,2 %, среднее значение составляет 35,0 %, коэффициент вариации – 17,5 %. Выполнены: статистический анализ, построение экспериментальной вариограммы, сопоставление сферической, гауссовой, экспоненциальной и линейной моделей, а также обыкновенный кригинг и анализ карты дисперсии кригинга. Установлено, что пространственная корреляция A_d100% слабая и нестабильная: уже на первом лаге вариограмма практически достигает порога, после чего колеблется вблизи *sill*. Карты изолиний A_d100% и дисперсии кригинга показали, что оценка достаточности сети должна базироваться не только на среднем расстоянии между скважинами, но и на конфигурации сети, локальной неоднородности качества и плотности наблюдений. Предложенный подход может использоваться для сопоставления рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и для выделения участков локального сгущения опережающего опробования.

Ключевые слова: опережающее опробование, сложноструктурный пласт, зольность, A_d100%, ситово-фракционный анализ, вариограмма, кригинг, дисперсия кригинга, сеть опробования

Для цитирования: Тагаев Е.А. Определение параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 36-42. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-36-42.

Determination of advance sampling grid parameters for coal quality control in a complex-structure seam

E. A. Tagaev✉
National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
✉ *tagaev.egor@mail.ru*

Abstract. The paper proposes a methodological approach to determining the parameters of an advance coal sampling grid for a complex-structured seam based on quality indicator modelling. The approach is motivated by the fact that seam-average quality estimates do not reliably predict local intervals that deteriorate the quality of mined coal in seams of complex structure. The methodology was tested for seam H16 of the Northwestern block of the Elga deposit, where the 3rd mineralized pack was treated as an independent geological-technological object. The calculation sample included 115 boreholes, and the A_d100% index accounting for full contamination by intra-seam rock partings was calculated for each borehole. A_d100% ranges from 23.0 to 60.2 %, with an average of 35.0 % and a coefficient of variation of 17.5 %. The procedure included statistical analysis, construction of the experimental variogram, comparison of spherical, Gaussian, exponential and linear models, ordinary kriging, and analysis of the kriging variance map. It was found that the spatial correlation of A_d100% is weak and unstable: the variogram nearly reaches the sill already at the first lag and then fluctuates around it. The kriged contour map of A_d100% and the kriging variance map show that the adequacy of the advance sampling grid should be assessed not only by mean spacing, but also by the grid configuration, local quality heterogeneity and observation density. The proposed approach can be used to compare 14 × 14 m and 20 × 20 m operational grids and to delineate areas where local densification of advance sampling is required.

© Тагаев Е. А., 2026

Keywords: advance sampling, complex-structured seam, ash content, A_d100%, sieve-float analysis, variogram, kriging, kriging variance, sampling grid

For citation: Tagaev E.A. Determination of advance sampling grid parameters for coal quality control in a complex-structure seam. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 36-42. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-36-42.

Введение

Достоверный прогноз качества угля перед добычей является одной из основных задач геолого-маркшейдерского обеспечения открытых горных работ. Для угольных месторождений сложного строения качество не может рассматриваться только как лабораторная характеристика отдельной пробы. Оно является пространственно распределенным свойством геологического тела и одновременно производственным параметром, влияющим на направление угольной массы, шихтование, складирование и режим последующего обогащения. В условиях сложноструктурного пласта основную неопределенность формируют не только изменения мощности пласта, но и различия между угольными пачками, мощность и зольность породных прослоев, распределение минеральной части по крупности и плотностным фракциям, а также неоднородность технологических свойств угля.

В существующих исследованиях подробно рассмотрены вопросы представительности проб качества углей [1], влияния тонких породных прослоев на зольность и управления качеством при разработке сложноструктурных месторождений [2–4]. Отдельное направление составляют работы по оптимизации разведочных и опробовательских сетей, оценке влияния расстояний между точками наблюдений и использованию геостатистических критериев при классификации ресурсов и оценке качества [5–9]. Вариограммный анализ и кригинг применяются для моделирования показателей качества углей, построения прогнозных поверхностей и оценки неопределенности [10–16]. Вместе с тем в большинстве работ геостатистическое моделирование выполняется по пласту или по усредненному показателю, тогда как внутренняя пачечная дифференциация сложноструктурного пласта учитывается недостаточно полно [17–19].

Для практики опережающего опробования такой подход ограничен. Сеть, достаточная для общей характеристики пласта, может быть недостаточной для выделения локальной высокозольной пачки, которая при выемке формирует отдельный поток угольной массы с неблагоприятными технологическими свойствами. Напротив, чрезмерное сгущение сети на всей площади приводит к росту затрат на бурение и лабораторные исследования без гарантированного прироста информативности. Следовательно, параметры сети должны быть связаны с фактической пространственной изменчивостью именно того геолого-технологического интервала, который определяет риск ухудшения качества.

Цель статьи: разработка методического подхода к определению параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта на основе моделирования качественных показателей.

В качестве исходной идеи принят переход от валовой оценки пласта к выделению целевой минерализованной пачки, расчету ее производственно значимого показателя зольности A_d100 %, вариограммному анализу, обыкновенному кригингу и технологической интерпретации результатов с использованием данных ситово-фракционного анализа (СФА).

Материал и методы исследования

Методический подход сформирован применительно к условиям пласта Н16 Северо-Западного участка Эльгинского месторождения. Пласт Н16 характеризуется сложным строением, значительной мощностью и наличием внутрипластовых породных прослоев. Для целей моделирования качества выделяется целевой геолого-технологический объект – 3-я минерализованная пачка. Такое выделение обусловлено ее повышенной зольностью, изменчивой мощностью, наличием породных прослоев и производственной значимостью при прогнозе качества добываемой угольной массы.

Исходная база методики включает структурные колонки скважин, координатную базу, таблицу интервалов по пачкам, результаты определения зольности и материалы ситово-фракционного анализа. Структурные колонки используются для выделения кровли и почвы пласта, разбиения разреза на пачки и фиксации внутрипластовых породных прослоев. Координатная база обеспечивает возможность построения вариограмм и карт качества. Таблица интервалов по пачкам необходима для исключения смешения разных геолого-технологических объектов в одной расчетной выборке. Материалы СФА используются как технологическое дополнение к пространственной модели, поскольку они позволяют интерпретировать природу повышенной зольности, долю тяжелых фракций и различия обогатимости.

Ключевым этапом подготовки данных является проверка сопоставимости одноименных пачек между скважинами. Если по отдельной скважине 3-я пачка не выделяется или принадлежность интервала к целевому объекту не подтверждена, то такая скважина не включается в расчетную выборку по A_d100%. Это правило предотвращает формирование неоднородной базы, в которой вариограмма отражала бы не природную пространственную изменчивость качества, а ошибки стратиграфической корреляции. Контроль исходных данных также включает проверку кровли и почвы интервала, мощности угольной части, мощности породных прослоев, арифметической согласованности мощности с учетом засорения и корректности координатной привязки.

Расчетным показателем качества принят A_d100% – зольность целевой пачки с учетом полного попадания внутрипластовых породных прослоев в добываемую массу. Такой показатель соответствует условиям валовой или частично селективной выемки и позволяет привести скважины к единой производственно значимой основе.

В общем виде расчет выполняется по средневзвешенной схеме

$$Ad_{100} = \frac{Ad_{\text{чуп}} m_{\text{чуп}} + \sum_{j=1}^{p} Ad_{\text{пр},j} m_{\text{пр},j}}{m_{\text{чуп}} + \sum_{j=1}^{p} m_{\text{пр},j}} \quad (1)$$

где $Ad_{\text{чуп}}$ – зольность чистой угольной части пачки, %; $m_{\text{чуп}}$ – мощность чистой угольной части пачки, м; $Ad_{\text{пр}, j}$ – зольность j-го породного прослоя, %; $m_{\text{пр}, j}$ – мощность j-го породного прослоя, м.

Если зольность отдельного прослоя не определена лабораторно, расчет должен выполняться по единому принятому правилу базы данных, одинаковому для всех скважин.

Статистический блок методики включает расчет числа наблюдений, минимального и максимального значений, среднего арифметического, медианы, дисперсии, стандартного отклонения и коэффициента вариации $A_d100\%$. Эти характеристики позволяют оценить общий уровень неоднородности и выявить резко отличающиеся значения. Такие значения не исключаются автоматически, а проверяются по исходным интервалам, мощности породных прослоев и принадлежности скважины к 3-й минерализованной пачке. Если значение подтверждается исходной геологической информацией, оно сохраняется как проявление природной или технологически значимой изменчивости качества.

Пространственная изменчивость $A_d100\%$ оценивается с помощью экспериментальной и нормированной вариограммы. Экспериментальная вариограмма показывает, как средняя величина различий между значениями показателя изменяется при увеличении расстояния между скважинами.

Нормированная вариограмма позволяет сопоставлять значения с уровнем дисперсии и интерпретировать расстояние, на котором пространственная связь существенно ослабляется:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [A(x_i) - A(x_i + h)]^2, \qquad (2)$$

где γ(h) – значение вариограммы на расстоянии *h*; *N(h)* – число пар наблюдений в данном лаге; $A(x_i)$ и $A(x_i + h)$ – значения показателя A_d100 % в точках, удаленных друг от друга на расстояние *h*.

Для задач опережающего опробования основное значение имеет не только форма вариограммы, но и число пар наблюдений по лагам, устойчивость первых лагов и расстояние практического приближения к порогу. Если вариограмма уже на первом лаге близка к уровню дисперсии, это указывает на малый масштаб пространственной связанности и необходимость плотного контроля качества.

На следующем этапе выполняется подбор теоретической модели вариограммы. В качестве сопоставляемых моделей могут использоваться сферическая, экспоненциальная, гауссова и линейная модели. Выбор модели должен определяться не только минимальной ошибкой аппроксимации, но и устойчивостью кригинговой поверхности, отсутствием резких артефактов, интерпретируемостью порога и практического радиуса, а также соответствием модели геологическому представлению о характере изменчивости целевой пачки.

Обыкновенный кригинг используется для перехода от точечных значений $A_d100\%$ к прогнозной поверхности качества. Его преимуществом является учет вариограммной модели и возможность получения не только карты изолиний, но и карты дисперсии кригинга. Последняя характеризует расчетную неопределенность прогноза и в большей степени зависит от конфигурации сети наблюдений и удаленности расчетного узла от скважин. Поэтому карта дисперсии используется как инструмент выделения зон недостаточной обеспеченности данными, а не как самостоятельное доказательство геологической неоднородности.

Данные ситово-фракционного анализа включаются в методику как технологический источник интерпретации. СФА раскрывает распределение угольной массы по классам крупности и плотностным фракциям, показывает долю тяжелого высокозольного материала и позволяет оценить, связана ли повышенная зольность с породными прослоями, тяжелыми фракциями или тонкодисперсной минерализацией угольного вещества [20–22]. Результаты СФА не всегда имеют точную координатную привязку, поэтому они не используются как самостоятельная основа для вариограммного анализа и кригинга.

Исходные данные и их роль в методике приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Исходные данные и их роль в методике / Source data and their role in the methodology

Группа данных	Содержание	Методическая роль
Структурные колонки	Кровля, почва, угольные пачки, породные прослои	Выделение целевой 3-й минерализованной пачки
Координаты скважин	*X, Y,* разведочные линии, положение точек наблюдений	Построение вариограмм и карт качества
Интервалы по пачкам	Разбиение H16 на 1, 2, 3-ю и 4-ю пачки	Проверка сопоставимости и формирование выборки
Зольность и мощность	*Ad* угольной части, мощность угля и прослоев	Расчет Ad100%
СФА	Классы крупности, плотностные фракции, зольность фракций	Технологическая интерпретация повышенной зольности

Результаты

Предлагаемый методический подход представляет собой последовательность операций, связывающих подготовку геологической базы, расчет показателя качества, геостатистическое моделирование и производственную оценку достаточности сети опережающего опробования. Логика подхода заключается в том, что параметры сети не назначаются только по типовой производственной схеме, а проверяются по масштабу пространственной изменчивости $A_d100\%$ целевой пачки.

Первый результат методики состоит в формировании целевой расчетной выборки. В нее включаются только те скважины, в которых 3-я минерализованная пачка уверенно выделена и сопоставима с одноименным интервалом в соседних скважинах. Для каждой точки фиксируются координаты *X, Y,* глубины кровли и почвы пачки, мощность чистой угольной части, суммарная мощность породных прослоев, зольность угольной части, принятая или определенная зольность прослоев и расчетное значение $A_d100\%$. Такой состав данных обеспечивает воспроизводимость последующих статистических и геостатистических операций.

Второй результат состоит в переходе от описания средней зольности пласта к показателю, непосредственно связанному с производственной задачей. Среднепластовая зольность может сглаживать вклад высокозольной пачки за счет более низкозольных интервалов. В отличие от нее показатель $A_d100\%$ характеризует качество целевого интервала с учетом внутрипластового засорения. Поэтому он более пригоден для обоснования плотности опережающего опробования в условиях, когда именно минерализованная пачка формирует риск ухудшения качества.

Третий результат связан с вариограммным анализом. Экспериментальная вариограмма A_d100% позволяет определить, сохраняется ли пространственная связанность качества между соседними скважинами и на каком расстоянии различия между значениями становятся близкими к общей дисперсии показателя. При слабой вариограммной структуре и быстром приближении к порогу уже на малых лагах сеть опережающего опробования должна рассматриваться как инструмент локального контроля, а не как формальное повторение разведочной сети.

Четвертый результат формируется при построении кригинговой поверхности и карты дисперсии. Карта изолиний A_d100% показывает вероятное положение зон повышенной и пониженной зольности в пределах целевой пачки. Карта дисперсии кригинга показывает участки, где прогноз менее обеспечен исходными данными. Совместный анализ этих карт позволяет разделить зоны повышенной зольности и зоны повышенной неопределенности. Это важно, поскольку решение о сгущении сети может быть вызвано как фактическим риском качества, так и недостаточной плотностью исходных наблюдений.

Методическая последовательность определения параметров сети опережающего опробования приведена на рисунке 1.

Пятый результат состоит в сопоставлении полученной пространственной модели с производственными вариантами сети. Для условий опережающего опробования могут использоваться сети 14 × 14 и 20 × 20 м. Их достаточность должна оцениваться по нескольким критериям: геологической сопоставимости целевой пачки, статистической изменчивости A_d100%, форме вариограммы, числу пар по лагам, устойчивости кригинговой поверхности, распределению дисперсии кригинга и технологической интерпретации СФА. Если при шаге 20 × 20 м сохраняется высокий риск пропуска локальных зон повышенной зольности или значительные зоны неопределенности, методика предусматривает переход к более плотной сети или локальное сгущение в пределах зон риска. Если пространственная структура и дисперсия прогноза допускают менее плотный контроль, шаг 20 × 20 м может рассматриваться как достаточный для соответствующего участка.

Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования представлены в таблице 2.

Важным элементом подхода является разделение геологического, статистического, геостатистического и технологического критериев. Геологический критерий отвечает за корректность выделения пачки и исключение смешения неоднородных интервалов. Статистический критерий оценивает общий диапазон изменчивости и относительный разброс A_d100%. Вариографический критерий характеризует масштаб пространственной связанности качества. Кригинговый критерий показывает устойчивость прогнозной поверхности и зоны повышенной дисперсии. Технологический критерий на основе СФА подтверждает или уточняет природу повышенной зольности, выявленной по координатно привязанным данным.

Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования показаны на рисунке 2.

Таблица 2 / Table 2

Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования / Criteria for assessing the sufficiency of the advance sampling grid

Критерий	Показатель оценки	Интерпретация
Геологический	Сопоставимость пачки, мощность, наличие прослоев	Определяет корректность выделения целевого объекта
Статистический	Диапазон Ad100%, коэффициент вариации, число точек	Характеризует общую неоднородность качества
Вариографический	Форма γ(h), число пар, практический радиус	Показывает масштаб пространственной связанности
Кригинговый	Изолинии Ad100%, дисперсия кригинга	Выделяет зоны повышенной зольности и неопределенности
Технологический	СФА, доля тяжелых фракций, обогатимость	Уточняет причины повышенной зольности

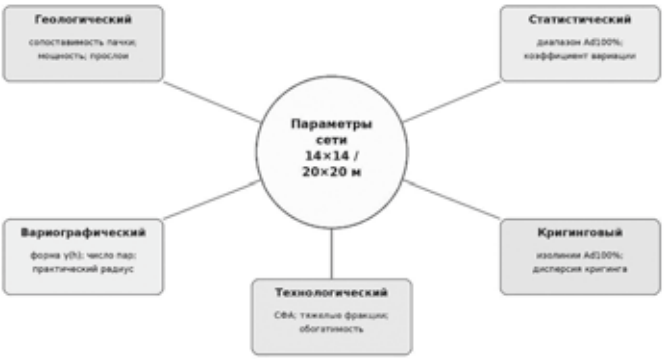


Рис. 2. **Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования /**
Fig. 2. **Criteria for assessing the sufficiency of the advance sampling grid**

На выборке из 115 скважин 3-й минерализованной пачки показатель A_d100% изменяется от 23,0 до 60,2 %. Среднее значение составляет 35,0 %, медиана – 34,9 %, стандартное отклонение – 6,10 %, коэффициент вариации – 17,46 %. Умеренный коэффициент вариации указывает на заметную, но не экстремальную неоднородность качества, при этом локальные отклонения оказываются существенными для практики оперативного контроля. Поэтому для дальнейшего обоснования параметров сети необходимо перейти от общей ста-



Рис. 1. **Методическая последовательность определения параметров сети опережающего опробования /**
Fig. 1. **Methodological sequence for determining advance sampling grid parameters**

тистической оценки к анализу пространственной структуры показателя.

Статистические характеристики A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16 приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Статистические характеристики A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16 / Statistical characteristics of A_d100% for the 3rd mineralized pack of seam H16

n, шт.	Минимум, %	Максимум, %	Среднее, %	Медиана, %	σ, %	*V*, %
115	23,0	60,2	35,0	34,9	6,10	17,46

Экспериментальная нормированная вариограмма A_d100% построена по пяти лагам. На первом лаге при среднем расстоянии между парами 279,8 м значение γ(h) составляет 1,02 и практически достигает уровня порога. На последующих лагах γ(h) изменяется от 0,76 до 1,22, оставаясь вблизи *sill*. Такая конфигурация указывает на слабую и нестабильную пространственную связанность показателя: различия между близкими скважинами велики уже на малых расстояниях, а радиус практической корреляции невелик. Сопоставление теоретических моделей показало, что сферическая, гауссова и экспоненциальная аппроксимации дают близкие ошибки, тогда как линейная модель заметно уступает им (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Сопоставление моделей вариограммы для A_d100 % / Comparison of variogram models for A_d100 %

Модель	RMSE	MAE	*Sill*, норм.	Параметр диапазона / *slope*
Сферическая	0,15843	0,13519	0,997	162,2 м
Гауссова	0,15843	0,13519	0,997	108,9 м
Экспоненциальная	0,15844	0,13526	0,997	108,9 м
Линейная	0,41133	0,30140	-	0,000685

Для картографического представления в статье принята экспоненциальная модель как наиболее устойчивая при построении поверхности кригинга (рис. 3).

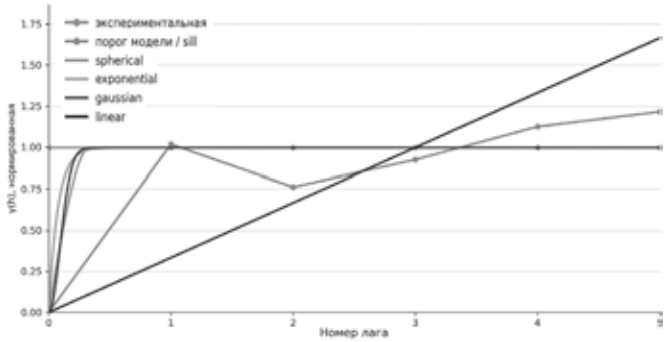


Рис. 3. **Экспериментальная нормированная вариограмма A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16 и сопоставление теоретических моделей / *Fig. 3.* Experimental normalized variogram of A_d100% for the 3rd mineralized pack of seam H16 and comparison of theoretical models**

Карта изолиний A_d100%, построенная методом *ordinary kriging* по экспоненциальной модели, показывает, что большая часть исследуемой площади характеризуется фоновыми значениями порядка 33–39 %. На этом фоне выделяются локальные зоны повышенной зольности, приуроченные к отдельным скважинам и их ближайшему окружению, а также участки относительного понижения A_d100%. Таким образом, пространственная картина качества оказывается мозаичной, без крупных устойчивых областей одинаковой зольности. Для практики опережающего опробования это означает, что решение о параметрах сети должно учитывать не только средний интервал между скважинами, но и возможность пропуска локальных высокозольных аномалий.

Карта изолиний A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16, построенная методом *ordinary kriging* (экспоненциальная модель) приведена на рисунке 4.

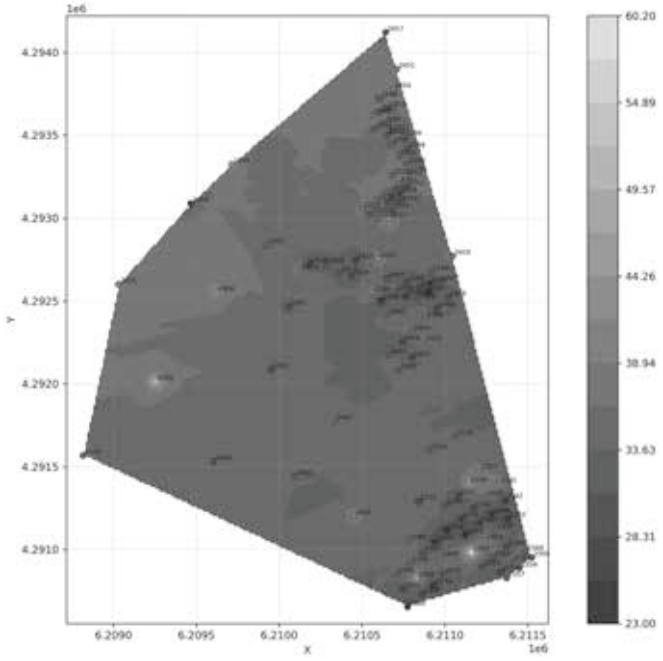


Рис. 4. **Карта изолиний A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16, построенная методом ordinary kriging (экспоненциальная модель) / *Fig. 4.* A_d100% contour map for the 3rd mineralized pack of seam H16 obtained by ordinary kriging (exponential model)**

Карта дисперсии *ordinary kriging* (рис. 5) дополняет интерпретацию качества оценкой надежности пространственного прогноза. По экспоненциальной модели нормированная дисперсия изменяется от 0,07 до 1,06 при среднем значении 1,00. Минимальные значения приурочены к сгущениям сети скважин, тогда как максимальные – к межскважинным пространствам и периферийным частям области интерполяции. Следовательно, карта дисперсии в первую очередь отражает плотность и конфигурацию сети, а не только природную изменчивость зольности. Именно это делает ее удобным инструментом для оценки достаточности рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и для выделения участков, где требуется локальное сгущение опережающего опробования.

Практическое применение подхода заключается в разделении участков на зоны базового контроля, зоны уплотненного контроля и зоны локального сгущения. Ограничением исследования является то, что часть технологических данных СФА не имеет плановой координатной привязки; поэ-

тому они используются для интерпретации обогатимости и природы повышенной зольности, но не как самостоятельные точки кригинга.

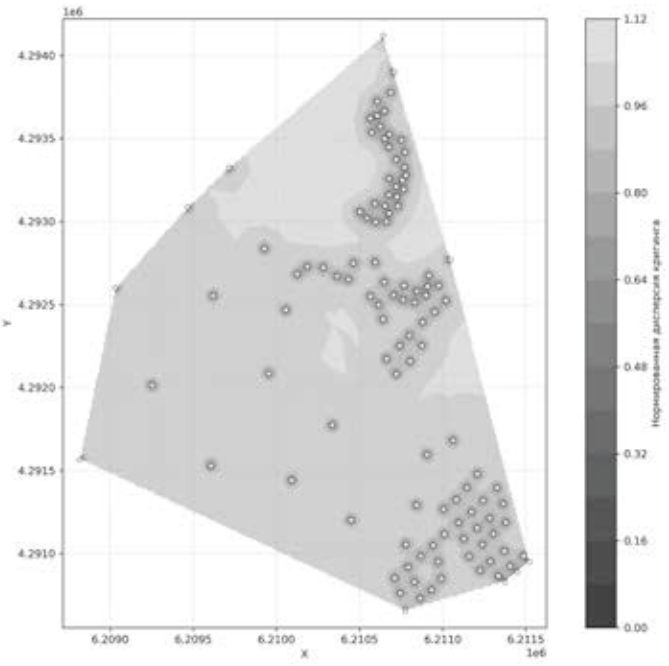


Рис. 5. **Карта дисперсии ordinary kriging для 3-й минерализованной пачки пласта Н16 (экспоненциальная модель) /**
Fig. 5. **Kriging variance map for the 3rd mineralized pack of seam H16 (ordinary kriging, exponential model)**

Полученные результаты показывают, что для сложноструктурного пласта параметры сети опережающего опробования должны определяться с учетом целевого интервала, а не только по среднепластовым значениям качества. Для 3-й минерализованной пачки Н16 сочетание повышенной расчетной зольности, слабой вариограммной структуры и неравномерной обеспеченности данными указывает на необходимость дифференцированного подхода к выбору шага сети.

Заключение

На основании изложенных в статье материалов можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработан методический подход к определению параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта на основе моделирования качественных показателей. Его основное отличие состоит в том, что параметры сети определяются не по пласту в целом, а по целевому геолого-технологическому объекту – 3-й минерализованной пачке.

2. В качестве основного расчетного показателя предложено использовать $A_d100\%$, характеризующий зольность целевой пачки при полном учете внутрипластовых породных прослоев. Этот показатель обеспечивает сопоставимость скважин и позволяет связать геологическое строение пачки с производственной задачей прогноза качества перед выемкой.

3. Обоснована последовательность операций, включающая выделение целевой пачки, контроль исходных данных, расчет $A_d100\%$, статистический анализ, построение экспериментальной и нормированной вариограммы, выбор теоретической модели, обыкновенный кригинг, анализ дисперсии кригинга и сопоставление результатов с производственными сетями опережающего опробования.

4. Показано, что данные СФА целесообразно использовать как технологический источник интерпретации, а не как самостоятельную координатную базу для кригинга. Они позволяют уточнить природу повышенной зольности, оценить вклад тяжелых фракций и подтвердить необходимость пачечного подхода к контролю качества.

5. Методика может применяться для оценки достаточности рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и для выделения участков, где требуется локальное сгущение опережающего опробования. Дальнейшее развитие подхода связано с накоплением данных оперативного опробования, уточнением параметров вариограммной модели и сопоставлением расчетных зон качества с фактическими результатами добычи и обогащения.

6. Апробация подхода на пласте Н16 показала, что расчетная выборка из 115 скважин характеризуется изменением $A_d100\%$ от 23,0 до 60,2 % при среднем значении 35,0 %. Экспериментальная вариограмма уже на первом лаге практически достигает порога и далее колеблется около *sill*, что указывает на слабую и нестабильную пространственную корреляцию. Карта *ordinary kriging* позволяет выделить локальные зоны повышенной зольности, а карта дисперсии – участки недостаточной обеспеченности наблюдениями. Это подтверждает целесообразность применения предложенного подхода для обоснования рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и их локального уточнения в пределах неоднородных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузнецов П.Ю., Гриб Н.Н., Качаев А.В. Анализ репрезентативности данных о качестве угля для создания базы данных по результатам детальной геологической разведки. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016; 6-5 (48): 137-140. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.081.
   Kuznetsov P.Yu., Grib N.N., Kachaev A.V. Analysis of representativeness of coal quality data for creation of a database based on detailed geological exploration. *International Research Journal.* 2016; 6-5 (48): 137-140. (In Russ.). https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.081.
2. Батугин С.А., Гаврилов В.Л., Хоютанов Е.А. Оценка влияния тонких породных прослоев на зольность угля Эльгинского месторождения. *Науковедение*. 2015; 7 (4). https://doi.org/10.15862/136TVN415.
   Batugin S.A., Gavrilov V.L., Khoyutanov E.A. Assessment of the influence of thin rock partings on ash content of coal at the Elga deposit. *Naukovedenie.* 2015; 7 (4). (In Russ.). https://doi.org/10.15862/136TVN415.
3. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Метод оценки природной и технологической составляющих зольности добываемого угля. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018; 5: 88-100. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180509.
   Khoyutanov E.A., Gavrilov V.L. Method for estimating natural and technological components of ash content in mined coal. *Journal of Mining Science.* 2018; 5: 88-100. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180509.
4. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Управление качеством добываемого угля при разработке сложноструктурных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019; 3: 62-71. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190308.

Khoyutanov E.A., Gavrilov V.L. Quality control of mined coal in development of complex-structured deposits. *Journal of Mining Science.* 2019; 3: 62-71. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190308.
5. Kuznetsov P.Yu., Grib N.N., Zhelyabina A.G. Exploration Testing Network Optimization at the Operational Stage of Coal Mining. *IOP Conference. Series*: *Earth and Environmental Science*. 2019; 272: 022034. https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022034.
6. Fisonga M., Wang F., Mutambo V. The estimation of sampling density in improving geostatistical prediction for geotechnical characterization. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021; 15 (6): 724-731. https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1526484.
7. Hernandez Guerra H., Alberdi E., Goti A. Influence of the sampling density in the coestimation error of a regionalized locally stationary variable. *Minerals*. 2020; 10 (2): 90. https://doi.org/10.3390/min10020090.
8. Amri N.A., Wulandari S., Cahyadi T.A., et al. Distance of Drill-Hole Determination based on Global Estimation Variance of Coal Resources Classification. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2023; 33 (1): 267-274. https://doi.org/10.37934/araset.33.1.267274.
9. Purba M.J., Wicaksono E. Optimization of Information Point Distances in the Estimation and Classification of Coal Resources Using Geostatistical Methods Compared to SNI 5015:2019 for Moderate Geological Conditions. *Mining Technology Journal*. 2023; 1 (1). https://doi.org/10.31315/mtj.v1i1.6826.
10. Ertunç G., Tercan A.E., Hindistan M.A, et al. Geostatistical estimation of coal quality variables by using covariance matching constrained kriging. *International Journal of Coal Geology*. 2013; 112: 14-25. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.11.014.
11. Pardo-Igúzquiza E., Dowd P.A., Baltuille J.M., et al. Geostatistical modelling of a coal seam for resource risk assessment. *International Journal of Coal Geology*. 2013; 112: 134-140. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.11.004.
12. Jeuken R., Xu C., Dowd P. Improving Coal Quality Estimations with Geostatistics *and Geophysical Logs Natural Resources Research*. 2020; 29 (4): 2529-2546. https://doi.org/10.1007/s11053-019-09609-y.
13. Sideri D., Roumpos C., Pavloudakis F., et al. Multivariate Geostatistical Modeling of Lower Calorific Value in Multi-Seam Coal Deposits. *Applied Sciences*. 2020; 10 (18): 6208. https://doi.org/10.3390/app10186208.
14. Gül Y., Küçükkarasu O. Resource estimation for Alpagut-Dodurga coal field and determination of spatial distribution of coal quality parameters. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2020; 29 (3): 521-537. https://doi.org/10.3906/yer-1910-17.
15. Faidatulaila R., Marwanza I., Purwiyono T. T. Variography analysis on the assessment of coal deposit quality using the ordinary kriging method. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2598: 060002. https://doi.org/10.1063/5.0126896.
16. Копытов А.И., Рогова Т.Б., Шаклеин С.В. Оценка ожидаемых погрешностей геометризации угольных месторождений на стадиях разведки и эксплуатации. *Горный журнал*. 2020; 4: 12-16. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.04.01.
Kopytov A.I., Rogova T.B., Shaklein S.V. Estimation of expected errors in geometrization of coal deposits at the stages of exploration and mining. *Mining Journal.* 2020; 4: 12-16. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2020.04.01.
17. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Оценка качественных показателей минерального сырья с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. 2020; 3: 29-37. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Assessment of quality indicators of mineral resources using geoinformation technologies of block modeling. *Geoinformatika.* 2020; 3: 29-37. (In Russ.). https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
18. Сидорова Г.П., Маниковский П.М. Прогнозирование качества угля с использованием блочной модели пласта на примере Кутинского буроугольного месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 12: 55-66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_55.
Sidorova G.P., Manikovskii P.M. Forecasting coal quality using a seam block model: a case study of the Kutinsky brown coal deposit. *Mining information and analytical bulletin.* 2022; 12: 55-66. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_55.
19. Noble A., Luttrell G.H. A review of state-of-the-art processing operations in coal preparation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015; 25 (4): 511-521. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.001.
20. Stone D., Campbell Q.P., le Roux M., et al. Assessment of coal washability data obtained via the RhoVol analyser. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2023; 123 (10): 509-512. https://doi.org/10.17159/2411-9717/1047/2023.
21. Sriramoju S.K., Singh R., Sengupta M., et al. Selective screening of coal to improve the washability characteristics at different levels of size reduction. *International Journal of Coal Preparation and Utilization.* 2021. https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1932845.
22. Maxwell K., Rajabi M., Esterle J., et al. Spatial modelling and classification of altered coal using random forest-based methods at Moatize Basin, Mozambique. *Journal of African Earth Sciences*. 2024; 105279. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105279.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Егор Андреевич Тагаев –
аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0009-0477-8841; e-mail: tagaev.egor@mail.ru

Вклад автора:
Постановка задачи исследования, написание текста статьи, обобщение изложенного материала, генерация идеи исследования.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 16.06.2026
Поступила после рецензирования: 29.08.2026
Принята к публикации: 09.09.2026

ABOUT THE AUTHORS

Egor A. Tagaev –
postgraduate student, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0009-0477-8841; e-mail: tagaev.egor@mail.ru

Author's contribution:
Formulation of the research problem, drafting the article, synthesizing the material, and generating the research idea.

Article info
Received: 16.06.2026
Revised: 29.08.2026
Accepted: 09.09.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 528.44:622.1
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-43-49

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 528.44:622.1

Сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек

М. Г. Выстрчил[1], М. В. Романов[2], Л. А. Рамирес-Мелендес[1]✉
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Акционерное общество «Артемовский рудник», г. Красноярск, Российская Федерация
✉ *s243021@stud.spmi.ru*

Резюме. Выполнен сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек в условиях открытых горных работ. Исходные пространственные данные получены по результатам UAV-фотограмметрии и обработаны в программном комплексе Agisoft Metashape с формированием плотного облака точек, цифровой модели поверхности и ортофотоплана. Для оценки влияния степени детализации пространственных данных исходное облако точек подвергалось последовательному прореживанию с увеличением шага между точками. Подсчет объемов выполнялся тремя подходами: методом TIN-поверхностей в AutoCAD Civil 3D, методом разности цифровых моделей поверхности в ГИС-среде и методом воксельного моделирования. Для каждой конфигурации пространственных данных определялись абсолютные отклонения и относительные погрешности объемных расчетов относительно базовой конфигурации с максимальной плотностью облака точек. Установлено, что при шаге прореживания до 10 м значения относительной погрешности для САПР- и ГИС-подходов не превышают допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %, однако при дальнейшем увеличении шага в ГИС-среде наблюдается ускоренный рост погрешности. Показано, что TIN-моделирование характеризуется большей устойчивостью к снижению плотности пространственных данных, тогда как воксельный подход демонстрирует стабильные результаты при анализе локальных участков. Полученные результаты могут быть использованы при выборе алгоритмов пространственного моделирования и параметров обработки UAV и LiDAR данных для производственного маркшейдерского контроля в условиях открытых горных работ.

Ключевые слова: облако точек, UAV-фотограмметрия, подсчет объемов, открытые горные работы, TIN-моделирование, ГИС, воксельное моделирование, пространственные данные

Для цитирования: Выстрчил М.Г., Романов М.В., Рамирес-Мелендес Л.А. Сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 43-49. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-43-49.

Comparative analysis of the stability of rock mass volume calculation methods under varying point-cloud density

M. G. Vystrchil1, M. V. Romanov2, L. A. Ramirez-Melendez[1]✉
1 Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation
2 JSC "Artyomovsky Mine", Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ *s243021@stud.spmi.ru*

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the stability of rock mass volume estimation methods under varying point-cloud density in open-pit mining conditions. The initial spatial data were obtained from UAV photogrammetry and processed in Agisoft Metashape to generate a dense point cloud, a digital surface model, and an orthomosaic. To evaluate the influence of spatial data density, the original point cloud was progressively decimated by increasing the spacing between neighbouring points. Volume calculations were performed using three approaches: TIN-based modelling in AutoCAD Civil 3D, digital surface difference analysis in a GIS environment, and voxel-based modelling. For each spatial-data configuration, absolute deviations and relative errors of volume estimation were determined with respect to the reference configuration corresponding to the maximum point-cloud density. The results show that for point spacings up to 10 m, the relative errors of both CAD- and GIS-based approaches remain within the allowable limit of σallow=1%. However, further increase in spacing leads to accelerated error growth in the GIS environment. The study demonstrates

© Выстрчил М. Г., Романов М. В., Рамирес-Мелендес Л. А., 2026

that TIN-based modelling exhibits higher stability under reduced spatial-data density, whereas the voxel-based approach provides comparatively stable results for local-scale analysis. The obtained results can be applied for selecting appropriate spatial-modelling algorithms and processing parameters for UAV- and LiDAR-based mine surveying in open-pit mining operations.

Keywords: point cloud, UAV photogrammetry, volume estimation, open-pit mining, TIN modelling, GIS, voxel modelling, spatial data

For citation: Vystrchil M.G., Romanov M.V., Ramirez-Melendez L.A. Comparative analysis of the stability of rock mass volume calculation methods under varying point-cloud density**.** *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 43-49. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-43-49.

Введение

Цифровые методы пространственного моделирования активно применяются при мониторинге устойчивости горных выработок, геомеханическом анализе и автоматизации горного производства [1, 2]. Подсчет объемов вынутой горной массы является одной из ключевых задач маркшейдерского обеспечения открытых горных работ, поскольку точность объемных расчетов непосредственно влияет на производственный учет, планирование горных работ, контроль технологических процессов и экономические показатели горнодобывающего предприятия [3]. В условиях современной цифровизации горного производства особую актуальность приобретает применение методов пространственного моделирования, основанных на данных дистанционного зондирования, фотограмметрии беспилотных летательных аппаратов, лазерного сканирования и геоинформационных технологий [4–10].

В последние годы технологии UAV-фотограмметрии и LiDAR-сканирования получили широкое распространение при решении задач определения объемов горной массы и мониторинга состояния открытых горных работ [4–8, 11–13]. Основными преимуществами цифровых методов являются высокая оперативность получения пространственных данных, возможность автоматизации вычислений и снижение трудоемкости маркшейдерских работ [12, 14]. При этом точность итоговых объемных расчетов зависит не только от качества исходной съемки, но и от особенностей алгоритмов пространственного моделирования, используемых при обработке облаков точек и построении цифровых моделей поверхности [5, 7, 15].

На практике для подсчета объемов наиболее широко применяются методы, основанные на построении TIN-поверхностей в САПР-средах, а также подходы, использующие растровые цифровые модели местности в геоинформационных системах [7, 12]. Одновременно прогрессирует направление воксельного моделирования, обеспечивающее пространственную дискретизацию облаков точек с дальнейшей локальной аппроксимацией геометрии изучаемой поверхности. Ряд исследований демонстрирует перспективность использования моделей на основе вокселей при работе с неоднородными пространственными данными и сложными геометрическими объектами [15], но стоит отметить, что вопросы устойчивости подобных подходов при варьировании плотности облака точек остаются недостаточно изученными.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных оценке точности UAV-фотограмметрии и цифровых методов подсчета объемов [4, 6, 8, 11, 13, 16], большая часть опубликованных работ ориентирована преимущественно на сравнение результатов цифровых измерений с традиционными геодезическими методами на анализ общей точности цифровых моделей местности. При этом существенно меньше внимания уделяется исследованию влияния степени прореживания облаков точек на устойчивость результатов объемных расчетов в различных программных средах и при использовании различных алгоритмов пространственного моделирования [7, 12, 15].

Особенно недостаточно изучены различия в чувствительности TIN-, raster- и voxel-based-подходов к снижению плотности пространственных данных в условиях открытых горных работ, где при выполнении регулярного производственного контроля маркшейдерская служба вынуждена балансировать между детализацией пространственной модели, вычислительными затратами и скоростью получения результата [3, 12]. В производственной практике уменьшение плотности облака точек позволяет значительно снизить вычислительную нагрузку и ускорить обработку данных, однако при этом возникает риск накопления ошибок при определении объемов горной массы.

Научная проблема исследования заключается в недостаточной изученности влияния степени прореживания пространственных данных на устойчивость результатов подсчета объемов при использовании различных алгоритмов цифрового моделирования поверхности в условиях открытых горных работ.

Цель исследований: установление закономерностей изменения точности и устойчивости подсчета объемов горной массы при снижении плотности пространственных данных для различных подходов цифрового моделирования с целью оптимизации выбора метода в производственной практике.

Материал и методы исследования

Исходные данные для настоящего исследования получены по результатам аэросъемки участка открытых горных работ с использованием беспилотного летательного аппарата. Аэросъемка выполнялась с использованием БПЛА DJI Mavic 2 на территории угольного разреза «Тугнуйский». Фотограмметрическая обработка данных выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape [17]. Исходное плотное облако точек содержало около 57 млн точек при среднем шаге между точками 0,38 м.

Фотограмметрическая обработка первичных материалов выполнена в программном комплексе Agisoft Metashape, в результате чего сформированы плотное облако точек, цифровая модель поверхности и ортофотоплан, использованные в качестве единой пространственной основы для дальнейшего сравнительного анализа [4, 6, 8].

Применение единой исходной пространственной базы позволило исключить влияние различий между независимыми съемками и сосредоточить исследование на оценке устойчивости методов подсчета объемов при изменении плотности пространственных данных и использовании различных алгоритмов моделирования поверхности [7, 12].

Аэросъемка выполнялась с перекрытием снимков, обеспечивающим формирование высокоплотного облака точек и корректное восстановление геометрии исследуемого участка. При фотограмметрической обработке использовались стандартные процедуры выравнивания изображений, построения плотного облака точек и генерации цифровой модели поверхности, рекомендованные для задач маркшейдерского обеспечения открытых горных работ [4]. Пространственная детализация исходного облака точек соответствовала среднему шагу между точками около 0,38 м, который в рамках настоящего исследования принят в качестве базовой конфигурации пространственных данных.

Для оценки влияния плотности пространственных данных на устойчивость объемных расчетов выполнялось последовательное контролируемое прореживание исходного облака точек с увеличением среднего расстояния между соседними точками. Выбор последовательности шагов прореживания обусловлен необходимостью поэтапной оценки влияния снижения плотности пространственных данных на устойчивость объемных расчетов при постепенном уменьшении детализации цифровой модели поверхности и снижении вычислительной нагрузки при обработке пространственных данных. В исследовании использовались значения шага 0,38; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60 и 70 м для анализа всего исследуемого участка. Выбор указанного диапазона обусловлен необходимостью оценки поведения алгоритмов как в условиях высоко детализированных пространственных данных, так и при существенном снижении плотности облака точек, характерном для ускоренной производственной обработки и ограниченных вычислительных ресурсов.

Для локального участка использовались меньшие значения шага (0,38; 1; 2,5 и 5 м), что связано с ограниченными размерами исследуемой области и необходимостью сохранения геометрической представительности модели при сравнительно малой площади анализируемого объекта.

Подсчет объемов выполнялся тремя независимыми подходами:

1. Первый подход был реализован в программном комплексе AutoCAD Civil 3D и основан на построении триангулированных нерегулярных сетей (TIN-поверхностей) с последующим определением объема как разности поверхностей в пределах заданного контура [7]. Данный подход широко применяется в маркшейдерской практике благодаря высокой адаптивности TIN-моделей к сложной геометрии рельефа и возможности локального сохранения характерных морфологических элементов поверхности.

2. Второй подход был реализован в ГИС-среде «Спутник», где расчет объема выполнялся на основе анализа разности цифровых моделей поверхности в пределах исследуемого полигона [10]. При этом цифровая модель поверхности использовалась в качестве основы численного определения объема, а ортофотоплан применялся для визуального контроля границ исследуемой области.

3. Третий подход был основан на воксельном моделировании пространственных данных. В данном случае облако точек дискретизировалось в виде регулярной трехмерной структуры, состоящей из элементарных пространственных ячеек – вокселей. В пределах каждого вокселя выполнялась локальная плоскостная аппроксимация распределения точек, после чего интегральный объем определялся суммированием частных объемов всех элементов расчетной области [7, 15]. При воксельном моделировании использовалось пространственное разрешение воксельного элемента 15 м. В процессе вокселизации пространство исследуемого объекта разделялось на регулярные трехмерные элементы фиксированного размера. После сегментации облака точек внутри каждого вокселя выполнялась локальная плоскостная аппроксимация распределения точек, что позволяло уменьшить влияние неоднородной плотности пространственных данных, локальных шумов и отдельных выбросов.

Интегральная оценка объема при воксельном подходе определялась выражением

$$V = \sum_{j=1}^{n} V_j \quad (1)$$

где V_j – объем j-го элемента; n – общее число вокселей, участвующих в расчете.

В отличие от методов, основанных на непрерывной интерполяции поверхности, воксельный подход снижает влияние локальной неоднородности распределения точек и обеспечивает устойчивость пространственной дискретизации при изменении плотности исходных данных.

В качестве базовой конфигурации для сравнительного анализа использовались расчеты с минимальным шагом между точками (0,38 м), соответствующим максимальной плотности облака, относительно которой определялись абсолютные отклонения и относительные погрешности объемных расчетов для каждого варианта прореживания как

$$\varepsilon_i = V_i - V_{\text{ref}}, \quad (2)$$

где V_i – объем, вычисленный при шаге i; V_{ref} – объем, полученный для базовой конфигурации пространственных данных.

Относительная погрешность определялась выражением

$$\sigma_i = \frac{|V_i - V_{\text{ref}}|}{V_{\text{ref}}} * 100\ \%, \quad (3)$$

где σ_i – относительная погрешность, %.

Сопоставление результатов выполнялось как для всего исследуемого участка, так и для локального фрагмента, что позволило оценить особенности поведения различных алгоритмов пространственного моделирования при изменении масштаба изучаемой области. При анализе соответствия нормативным требованиям использовалось предельное значение допустимой относительной погрешности $\sigma_{доп}$ = 1 % для объемов свыше 2 млн м³.

Результаты исследований

На основании полученных расчетных данных были построены зависимости объема выемки от шага прореживания пространственных данных для САПР- и ГИС-подходов (рис. 1).

При минимальных значениях шага результаты расчетов в обеих программных средах практически совпадают. По мере увеличения расстояния между точками наблюдается постепенное расхождение вычисленных значений объема. Наиболее существенные различия фиксируются при шагах свыше 20 м, когда снижение плотности пространственных данных приводит к заметному изменению результатов расчета.

Для количественной оценки изменения результатов относительно базовой конфигурации пространственных данных был выполнен расчет абсолютных отклонений и относительных погрешностей объемов (табл. 1).

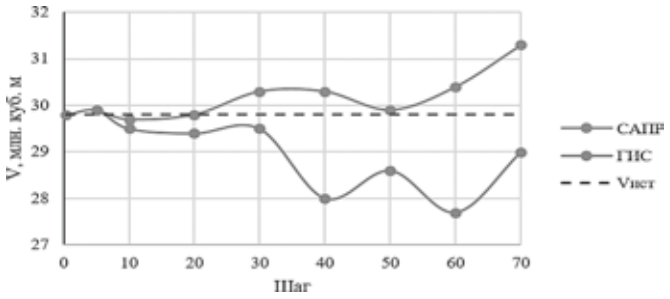


Рис. 1. **Зависимость объема выемки от величины шага (САПР и ГИС) /**
Fig. 1. **Dependence of the recess volume on the pitch size (CAD and GIS)**

Таблица 1 / Table 1

Отклонения и погрешности определения объемов /
Deviations and errors in volume determination

Шаг, м	Количество точек, млн точек	V выемки, млн м³		ε, млн м³		σ, %	
		Civil	ГИС	Civil	ГИС	Civil	ГИС
0,38	57	-	29,8	-	0	-	0
5	0,32	29,9	29,9	0,1	0,1	0,3	0,3
10	0,078	29,7	29,5	-0,1	-0,3	0,3	1,0
20	0,019	29,8	29,4	0	-0,4	0	1,3
30	0,008	30,3	29,5	0,5	-0,3	1,7	1,0
40	0,005	30,3	28	0,5	-1,8	1,7	6,0
50	0,003	29,9	28,6	0,1	-1,2	0,3	4,0
60	0,002	30,4	27,7	0,6	-2,1	2,0	7,0
70	0,0015	31,3	29	1,5	-0,8	5,0	2,7

На основании вычисленных значений отклонений были построены зависимости изменения абсолютного отклонения объема от величины шага прореживания пространственных данных (рис. 2).

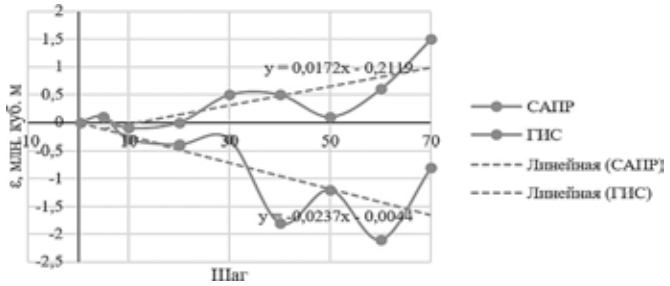


Рис. 2. **Зависимость отклонений объема от величины шага /**
Fig. 2. **Dependence of volume deviations on step size**

Для САПР-подхода наблюдается преимущественно положительное отклонение результатов относительно базовой конфигурации, тогда как для ГИС-подхода характерно преобладание отрицательных отклонений. С увеличением величины шага абсолютные значения отклонений возрастают в обеих программных средах.

Зависимости относительной погрешности определения объемов от величины шага представлены на рисунке 3.

Установлено, что при шаге до 10 м значения относительной погрешности для обоих подходов не превышают допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %. При дальнейшем увеличении шага наблюдается ускоренный рост погрешности для ГИС-подхода, тогда как результаты САПР сохраняют допустимый уровень точности в более широком диапазоне значений шага.

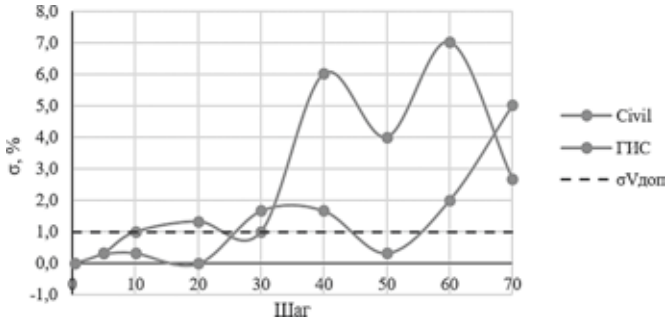


Рис. 3. **Зависимость относительной погрешности σ от величины шага ($\sigma_{доп}$ = 1 %) /**
Fig. 3. **Dependence of the relative error σ on the step value (σ_{dop} = 1 %)**

Результаты расчетов для локального участка

Для дополнительного анализа устойчивости методов был выделен локальный участок в пределах ограниченной области исследования (рис. 4).

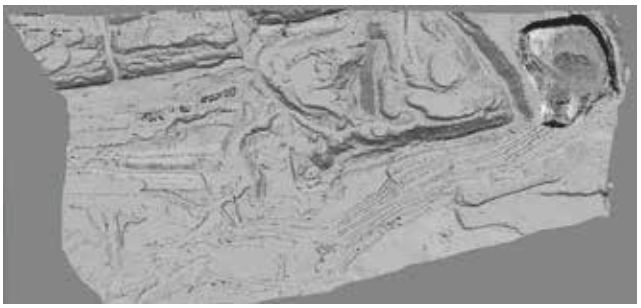


Рис. 4. **Ограничение области исследования (локальный участок) /**
Fig. 4. **Limitation of the research area (local area)**

Локальный участок характеризуется меньшими пространственными размерами по сравнению с основным полигоном исследования, что позволило выполнить сопоставление результатов при более детализированных значениях шага прореживания.

Результаты вычисления объемов, абсолютных отклонений и относительных погрешностей для локального участка представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Отклонения и погрешности определения объемов /
Deviations and errors in volume determination

Шаг, м	V, млн м³			ε, млн м³			σ, %		
	САПР	ГИС	Voxel	САПР	ГИС	Voxel	САПР	ГИС	Voxel
0,38	4,55	4,54	4,53	0	0,01	0,02	0	0,2	0,4
1	4,53	4,53	4,54	0,01	0,02	0,01	0,3	0,4	0,3
2,5	4,53	4,51	4,55	0,02	0,03	0,00	0,4	0,7	0
5	4,53	4,52	4,54	0,02	-0,03	0,01	0,4	0,7	0,2

По результатам расчетов построены зависимости объема локального участка от величины шага прореживания пространственных данных (рис. 5).

Даже при минимальных значениях шага расчетные объемы, полученные различными подходами, не совпадают полностью. По мере увеличения шага различия между результатами становятся более выраженными.

Зависимости абсолютных отклонений объема локального участка от величины шага представлены на рисунке 6.

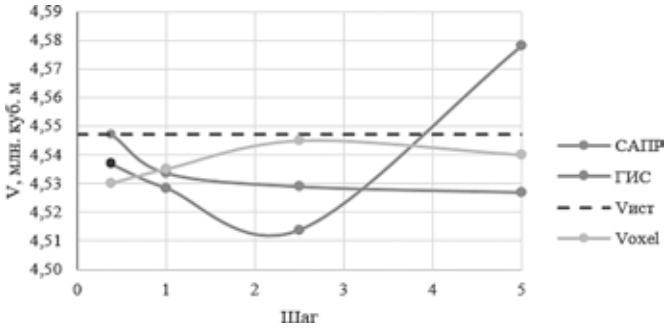


Рис. 5. **Зависимость объема локального участка от величины шага /**
Fig. 5. **Dependence of the volume of the local area on the step size**

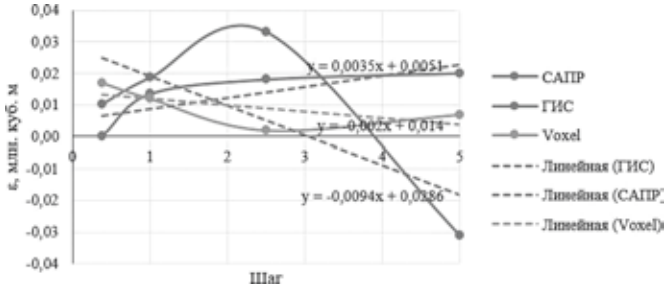


Рис. 6. **Зависимость отклонений объема локального участка от величины шага /**
Fig. 6. **Dependence of deviations of the volume of the local area on the step size**

Для САПР-подхода наблюдается постепенное увеличение отклонений с ростом шага прореживания. Для ГИС-подхода характерны более высокие значения отклонений, тогда как воксельный подход демонстрирует сравнительно стабильные результаты в пределах исследуемого диапазона значений шага.

Зависимости относительной погрешности определения объема локального участка представлены на рисунке 7.

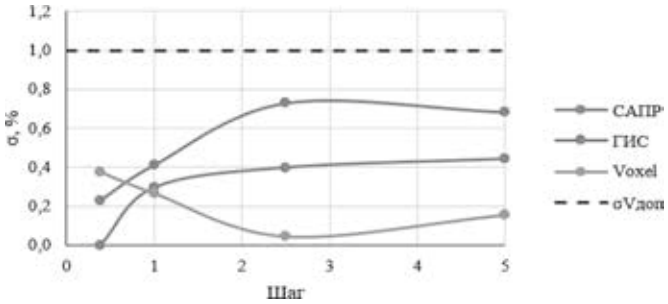


Рис. 7. **Зависимость погрешности σ локального участка от величины шага ($\sigma_{доп}$ = 1 %) /**
Fig. 7. **Dependence of the error σ of the local area on the step value (σ_{dop} = 1 %)**

Во всех исследованных вариантах значения относительной погрешности не превышают допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %. При этом минимальные значения погрешности при увеличении шага наблюдаются для воксельного подхода, тогда как максимальные значения характерны для ГИС-моделирования.

Обсуждение результатов

Влияние алгоритмов моделирования на устойчивость объемных расчетов

Полученные результаты показывают, что устойчивость объемных расчетов существенно зависит от алгоритма пространственного моделирования.

Наиболее стабильные результаты при увеличении шага прореживания продемонстрировал САПР-подход на основе TIN-поверхностей. Это обусловлено использованием нерегулярной триангуляции Делоне, обеспечивающей адаптивное представление локальной геометрии и лучшее сохранение морфологических особенностей рельефа при снижении плотности данных.

Для ГИС-подхода наблюдается более быстрый рост погрешности из-за растровой интерполяции и эффекта сглаживания при утрате локальных особенностей рельефа. В то же время воксельное моделирование демонстрирует стабильность на локальных участках за счет пространственной дискретизации в объемных элементах, в которых влияние топологии поверхности менее выражено по сравнению с TIN- и растровыми моделями.

Влияние прореживания облака точек на результаты расчетов

Анализ показывает, что снижение плотности облака точек существенно влияет на точность определения объемов горной массы: при увеличении шага прореживания уменьшается пространственная детализация модели и возрастает риск потери локальных геометрических элементов рельефа. Эти результаты согласуются с исследованиями о влиянии плотности пространственных данных на точность фотограмметрических измерений и расчетов объемов [4, 8, 13], а также с работами по обработке данных UAV-фотограмметрии и цифрового моделирования горных объектов [7, 11].

При этом чувствительность алгоритмов к прореживанию существенно различается: для ГИС-подхода критический рост погрешности наблюдается при шагах свыше 10–20 м, тогда как TIN-моделирование сохраняет устойчивость при дальнейшем снижении плотности данных.

Практическое значение результатов

Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров обработки пространственных данных для производственного маркшейдерского контроля в условиях открытых горных работ. Установлено, что TIN-подход позволяет сохранять допустимый уровень точности в более широком диапазоне шага прореживания при ускоренной обработке и снижении вычислительной нагрузки, тогда как ГИС-подход эффективен лишь при высокой плотности данных и демонстрирует повышенную чувствительность к снижению детализации.

Воксельное моделирование является перспективным направлением для анализа локальных объектов и неоднородных облаков точек, но для промышленного применения требуется дальнейшая разработка алгоритмов пространственной аппроксимации и дополнительная экспериментальная валидация. Ограничением исследования является использование данных одного объекта и экспериментальная реализация воксельного алгоритма, нуждающаяся в оптимизации и расширенной валидации на различных горнотехнических объектах.

Заключение

1. Установлено, что увеличение шага прореживания облака точек вызывает рост абсолютных отклонений и относительных погрешностей объемных расчетов из-за снижения пространственной детализации цифровой модели поверхности.

2. Сопоставление методов показало, что TIN-подход в AutoCAD Civil 3D обладает большей устойчивостью к снижению плотности данных по сравнению с raster-моделированием в ГИС, в то время как воксельный подход продемонстрировал стабильность при анализе локального участка.

3. Определено, что при шаге до 10 м относительная погрешность для САПР- и ГИС-подходов не превышает допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %, но при дальнейшем увеличении шага в ГИС-среде наблюдается ускоренный рост погрешности.

4. Установлено, что выбор алгоритма пространственного моделирования существенно влияет на устойчивость объемных расчетов в условиях открытых горных работ, что подтверждает необходимость обоснованного выбора параметров обработки данных при производственном маркшейдерском контроле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Afanasiev P.I., Medina S.Ya., Savon V.Yu. et al. The Analysis of Slope Stability of the Mining Road of the Camarioca Este Deposit of the Comandante Ernesto Che Guevara Company. *Occupational Safety in Industry*. 2024; 4: 78-84. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-4-78-84.
2. Хохлов С.В. Применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы. *Записки Горного института*. 2025; 275: 196-204.
   Khokhlov S.V. Application of digital simulation methods for predicting parameters of blasted rock muckpile. *Journal of Mining Institute.* 2025; 275: 196-204. (In Russ.).
3. Alsayed A., Nabawy M.R.A. Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments: A Review. *Drones*. 2023; 8 (7): 537. https://doi.org/10.3390/drones7080537.
4. Ajayi O.G., Ajulo J. Investigating the Applicability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry for the Estimation of the Volume of Stockpiles. *Quaestiones Geographicae*. 2021; 1 (40): 25-38. https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0002.
5. Gusev V.N., Filippov A.A. Application of GNSS, LiDAR and UAVs for monitoring open-pit mine volumes. *Journal of Mining Institute*. 2026; (278): 123-135. https://doi.org/10.31897/PMI.2026.12.
6. Kim Y.H., Shin S.S., Lee H.K. et al. Field Applicability of Earthwork Volume Calculations Using Unmanned Aerial Vehicle. *Sustainability*. 2022; 15 (14): 9331. https://doi.org/10.3390/su14159331.
7. Meng X., Wang T., Cheng D. et al. Enhanced Point Cloud Slicing Method for Volume Calculation of Large Irregular Bodies: Validation in Open-Pit Mining. *Remote Sensing*. 2023; 20 (15): 5006. https://doi.org/10.3390/rs15205006.
8. Voloshina E.A., Novozhenin S.Yu., Kelekhsaev S.K. Substantiation of use of unmanned aerial vehicles in volume evaluation of mineral storages. *MIAB*. 2023; 11-1: 305-321. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_305.
9. Wen Y., Yao X., Li C. et al. Calculation of Excavation Volume in Open-Pit Mines Under Complex Conditions Based on Multi-Source Stereo Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2026; 4 (18): 654. https://doi.org/10.3390/rs18040654.
10. Курбатова В.В., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю. и др. Параметрическая сходимость результатов съемки беспилотных воздушных аппаратов «Геоскан 401» и GNSS при выполнении маркшейдерских работ на месторождении «Наталка» Магаданской области. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 2 (124): 76-80. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_76_80.
    Kurbatova V.V. Lomakina N.E., Garifulina I.Y. et al. Parametric convergence of survey results from Geoscan 401 unmanned aerial vehicles and GNSS during mine surveying works at the Natalka deposit in the Magadan Oblast. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2023; 2 (124): 76-80. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_76_80. (In Russ.).
11. Dhakal S., Manandhar A., Shah A. et al. Integrating UAS Remote Sensing and Edge Detection for Accurate Coal Stockpile Volume Estimation. *Remote Sensing*. 2025; 18 (17): 3136. https://doi.org/10.3390/rs17183136.
12. Szafarczyk A., Siwek M. GIS-Based Process Automation of Calculating the Volume of Mineral Extracted from a Deposit. *Geosciences*. 2025; 8 (15): 315. https://doi.org/10.3390/geosciences15080315.
13. Yin C. Wen Q., Liu S. et al. Volume Estimation of Land Surface Change Based on GaoFen-7. *Remote Sensing*. 2025; 7 (17): 1310. https://doi.org/10.3390/rs17071310.
14. Выстрчил М. Г., Мукминова Д. З., Балтыжакова Т. И. и др. Алгоритм вычисления деформаций подземных горных выработок на основании данных лазерно-сканирующей съемки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025; 11-1: 57-76. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_111_0_57.
    Vystrchil M. G., Mukminova D. Z., Baltyzhakova T. I. et al. Algorithm for calculating deformations of underground mine workings based on laser scanning survey data. *MIAB.* 2025; 11-1: 57-76. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_111_0_57.
15. Ivanov S.P., Petrova E.M. Point cloud algorithms for rock mass volume estimation. *Eurasian Mining*. 2026; 1: 34-45. https://doi.org/10.17580/em.2026.01.04.
16. Lee S.B., Han D., Song M. Calculation and Comparison of Earthwork Volume Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry and Traditional Surveying Method. *Sensors and Materials*. 2022; 12 (34): 4737. https://doi.org/10.18494/SAM4192.
17. Колесатова О.С., Колкова М.С., Горбатова Е.А. и др. Анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 38-46. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46.
    Kolesatova O.S., Kolkova M.S., Gorbatova E.A. et al. Analysis of rock mass structural heterogeneity in the open pit of the Yubileynoye deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 38-46. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Михаил Георгиевич Выстрчил –
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры маркшейдерского дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0002-1669-7776;
e-mail: ratven@yandex.ru

Михаил Вячеславович Романов –
начальник ПТО АО «Артемовский рудник», г. Красноярск, Российская Федерация;
e-mail: mihail.romanov@sngoldmining.ru

Луис Альберто Рамирес-Мелендес –
аспирант кафедры маркшейдерского дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0002-6459-8975;
e-mail: s243021@stud.spmi.ru

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе в работу.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.06.2026
Поступила после рецензирования: 13.09.2026
Принята к публикации: 19.09.2026

ABOUT THE AUTHOR

Mikhail G. Vystrchil –
Cand. (Sci.) Eng. Department of Mine Surveying. "Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University", Saint Petersburg, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0002-1669-7776;
e-mail: ratven@yandex.ru

Mikhail V. Romanov –
Head of Vocational Training Department of JSC "Artyomovsky Mine", Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: mihail.romanov@sngoldmining.ru

Luis Alberto Ramirez-Melend –
Postgraduate student, "Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University", Saint Petersburg, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0002-6459-8975;
e-mail: s243021@stud.spmi.ru

Contribution:
The authors declare the equal contribution to the work in the article.

Conflicts of Interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 03.06.2026
Revised: 13.09.2026
Accepted: 19.09.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.235
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-50-55

ORIGINAL ARTICLE
UDC 622.235

Метод формирования скважинного заряда патронированным эмульсионным взрывчатым веществом в обводненных скважинах на карьерах строительных материалов Приморского края

А. Р. Тухбатулин[1]✉, Ю. А. Васянович[1], П. С. Таран[2]
[1]Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация
[2]ООО «Якутская взрывная компания», г. Спасск-Дальний, Российская Федерация
✉ *zx365@yandex.ru*

Резюме. Рассматривается проблема заряжания обводненных скважин патронированными эмульсионными взрывчатыми веществами в условиях, когда применение смесительно-зарядных машин невозможно или экономически нецелесообразно. Традиционный ручной метод заряжания часто приводит к нарушению целостности колонки заряда, образованию водяных прослоек, застреванию патронов. Для решения этих проблем предложено новое устройство для формирования колонки заряда. Метод позволяет контролируемо опускать патрон в скважину, избегая гидроудара при переходе из воздушной среды в водную, предотвращает застревание патрона и образование водяных прослоек. Разработанное техническое решение рекомендуется для промышленного применения на открытых горных работах в сложных гидрогеологических условиях. Также обозначены направления дальнейших исследований: оценка эффективности на скважинах других диаметров, измерения скорости детонации и анализ выхода негабарита.

Ключевые слова: открытые горные работы, буровзрывные работы, обводненные скважины, патронированные эмульсионные взрывчатые вещества, ручное заряжание, устройство для формирования заряда, целостность колонки заряда

Для цитирования: Тухбатулин А.Р., Васянович Ю.А., Таран П.С. Метод формирования скважинного заряда патронированным эмульсионным взрывчатым веществом в обводненных скважинах на карьерах строительных материалов Приморского края. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 50-55. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-50-55.

Method of forming a borehole charge with cartridged emulsion explosive in flooded boreholes at construction material quarries in Primorsky krai

A. R. Tukhbatulin[1]✉, Yu. A. Vasyanovich[1], P. S. Taran[2]
[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Vladivostok State University", Vladivostok, Russian Federation
[2]Yakutskaya Vzryvnaya Kompaniya LLC (Yakut Explosive Company), Spassk-Dalny, Russian Federation
✉ *zx365@yandex.ru*

Abstract. The article addresses the problem of charging water-filled boreholes with cartridged emulsion explosives in conditions where the use of mixing-charging machines is impossible or economically impractical. The traditional manual charging method often leads to disruption of the charge column integrity, formation of water interlayers, and sticking of cartridges. To solve these problems, a new device for forming the charge column is proposed. The method allows controlled lowering of the cartridge into the borehole, avoiding water hammer during the transition from the air environment to the water environment, and prevents sticking and the formation of water interlayers. The developed technical solution is recommended for industrial application in open-pit mining operations under complex hydrogeological conditions. The article also outlines directions for further research: evaluating effectiveness in boreholes of other diameters, increasing the sample size, direct measurements of detonation velocity, and analysis of oversized fragment yield.

Keywords: open-pit mining, drilling and blasting operations; water-filled boreholes; cartridged emulsion explosives; manual charging; charge forming device; charge column integrity

© Тухбатулин А. Р., Васянович Ю. А., Таран П. С., 2026

For citation: Tukhbatuli A.R., Vasyanovich Yu.A., Taran P.S. Method of forming a borehole charge with cartridged emulsion explosive in flooded boreholes at construction material quarries in Primorsky krai. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 50-55. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-50-55.

Введение

Буровзрывные работы на открытых горных работах остаются ключевым технологическим процессом, определяющим эффективность и экономику всего производственного цикла. Особую сложность представляет проведение взрывных работ в обводненных условиях, когда скважины заполнены водой. Традиционное использование гидрофобных, водоустойчивых эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), заряжаемых с помощью смесительно-зарядных машин (СЗМ), является наиболее распространенным и эффективным решением для таких условий [1–4]. Однако на практике встречается множество случаев, когда применение СЗМ технологически невозможно или экономически нецелесообразно: при разовых работах на удаленных или небольших месторождениях, в стесненных условиях карьеров сложной конфигурации, при ограниченном объеме взрывных работ, а также в случаях логистических ограничений на доставку спецтехники и компонентов ВВ.

Современная взрывная технология на карьерах Приморского края базируется на применении двух типов взрывчатых веществ, выбор которых диктуется состоянием обводненности скважин. В сухих скважинах применяются составы на основе «Гранулита ПС». В обводненных скважинах используются водоустойчивые ВВ: «Сипекс» и «Гранит-90П».

Их ключевые характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики применяемых взрывчатых веществ в Приморском крае / Characteristics of explosives used in Primorsky Krai

Наименование взрывчатых веществ	Кислородный баланс, %	Удельная теплота взрыва, Ккал/кг	Удельный объем газов, л/кг	Плотность, г/см³	Скорость детонации, км/с	Критический диаметр, мм
«Гранулит ПС»	0–1,0	920	990	0,7–0,9	4,0–4,5	240
«Сипекс»	-2	676	1 020	1,05–1,25	4,1	80
«Гидронит-П»	-1,42	726	47	1,05–1,25	4,1	75

В условиях, когда применение СЗМ невозможно, основным методом заряжания обводненных скважин остается применение патронированных ЭВВ. Классическая методика ручной зарядки в обводненную скважину сопряжена с рядом существенных недостатков: повышенной трудоемкостью, снижением скорости заряжания. Также в работах [5–9] поднимается вопрос о риске нарушения целостности колонки заряда путем образования водяных прослоек.

Схема нарушения целостности колонки заряда представлена на рисунке 1.

Данная проблема влечет за собой несколько негативных факторов, а именно неполное детонирование заряда, повышенный выход негабарита, неконтролируемый разлет кусков породы [10] за счет увеличения коэффициента заполнения скважин взрывчатым веществом. Этот коэффициент используется для расчета опасных зон по разлету отдельных кусков породы в соответствующем законодательстве [11–12].

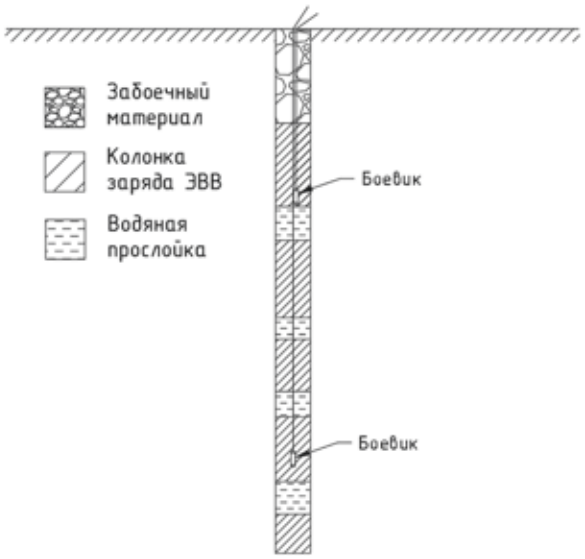


Рис. 1. **Схема нарушения целостности колонки заряда в обводненных условиях /**
Fig. 1. **Diagram of charge column integrity violation in water-filled conditions**

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка и внедрение новых методов зарядки патронированных ЭВВ в обводненные скважины, которые позволили бы минимизировать указанные негативные факторы в условиях отсутствия СЗМ. Такой метод должен обеспечивать надежное, быстрое и безопасное размещение заряда на проектном интервале скважины, гарантировать его полную усадку и сохранение целостности колонки заряда до момента инициирования.

Цель работы: разработка нового метода скважинной зарядки патронированным эмульсионным взрывчатым веществом (ЭВВ) путем использования специального устройства для формирования колонки заряда патронированным ЭВВ в обводненных условиях, которое позволяет эффективно преодолевать водяной столб для применения на карьерах строительных материалов Приморского края.

Научная новизна работы заключается в обосновании конструктивных и технологических параметров предлагаемого решения, а его практическая значимость – в расширении арсенала средств для ведения буровзрывных работ в сложных гидрогеологических условиях при ограниченных технических возможностях.

Методика исследования

В рамках научной работы разработано устройство для формирования конструкции заряда в обводненных скважинах патронированным ЭВВ.

Принцип исследования заключается в фиксации фактических данных при заряжании ручным методом с применением специального устройства для формирования колонки заряда в скважинах разной степени обводненности диаметром 120 мм. Фиксация данных происходит в электронные таблицы.

Параметры для фиксации: фактическая вместимость в определенный интервал времени, длина столба воды, длина скважины.

Результаты работы

Описание устройства и метод применения

Вид специального устройства для формирования колонки заряда патронированным ЭВВ в обводненных условиях приведен на рисунке 2.

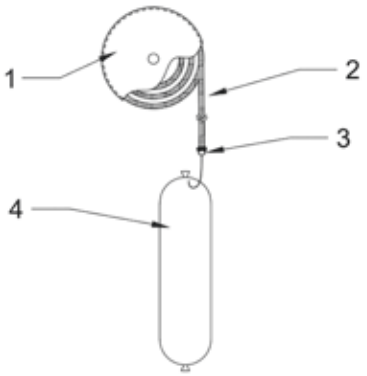


Рис. 2. **Устройство для формирования скважинного заряда патронированным эмульсионным взрывчатом веществом: 1 – рулетка с механизмом обратной пружины; 2 – неметаллический трос; 3 – крюк, состоящий из искробезопасного материала; 4 – патрон ЭВВ /**
Fig. 2. **Device for forming a borehole charge with cartridged emulsion explosive: 1 – tape measure with return spring mechanism; 2 – non-metallic cable; 3 – hook made of spark-safe material; 4 – cartridge of emulsion explosive**

Устройство состоит из гибкого троса и крюка, выполненных из искробезопасного материала. Крюк закреплен на тросе надежным узлом, длина троса должна быть больше 2 м длины заряжаемой скважины. Перед опусканием в скважину патрон надрезается, крюк фиксируется за оболочку патрона с его торца. Патрон опускают в скважину на тросе, контролируя его траекторию до достижения колонки заряда. После этого взрывник прикладывает к тросу резкое усилие на подъем, в результате чего оболочка патрона надрывается по месту крепления крюка, затем устройство извлекается из скважины.

Механизм достижения целостности колонки заряда

Как показано в исследованиях [10], процесс заряжения патронированного ЭВВ в обводненных условиях сопряжен с рядом технологических рисков: возможно застревание патрона из-за неровности стенок скважины с образованием водяных прослоек, что снижает или полностью прекращает детонацию; при переходе из воздушной среды в водную патрон подвергается гидродинамическому удару, ведущему к разрушению оболочки и закупорке ствола.

Для повышения качества взрывной отбойки и минимизации выхода негабарита критически важно обеспечить целостность колонки скважинного заряда. Предлагаемое устройство решает проблему образования водяных прослоек при формировании заряда патронированным ЭВВ. Это позволяет повысить скорость детонации, улучшить гранулометрический состав раздробленной горной массы и, как следствие, снизить затраты на последующее дробление негабарита.

Результат достигают путем контролированного опускания патрона ЭВВ по стволу скважины. При переходе фазы воздух – вода патрон не разбивает о зеркало воды, что не приводит к закупориванию скважины. По мере движения в воде патрон не застревает в стенках ствола скважины, что дает возможность сформировать столб заряда без образования водяных прослоек. Под собственным весом патроны раскрываются по мере формирования столба колонки заряда.

Схема способа работы устройства при формировании колонки заряда в обводненных условиях при работе патронированным ЭВВ представлена на рисунке 3.

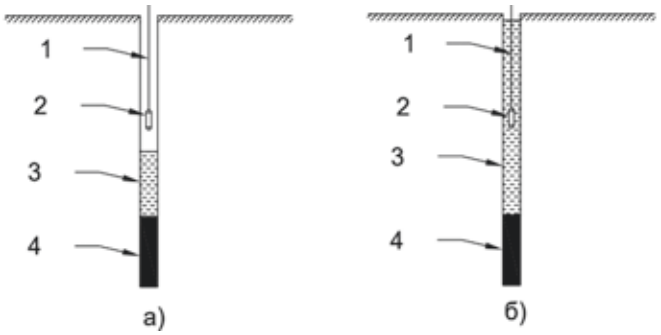


Рис. 3. **Схема способа работы устройства при формировании колонки патронированного эмульсионного взрывчатого вещества: а – при частичном обводнении; б – при обводнении под устья скважины: 1 – трос; 2 – патрон ЭВВ; 3 – вода; 4 – сформированная колонка ЭВВ /**
Fig. 3. **Diagram of the device operating method for forming a column of cartridged emulsion explosive: a – under partial water filling; b – under water filling up to the borehole collar: 1 – cable; 2 – cartridge of emulsion explosive; 3 – water; 4 – formed column of emulsion explosive**

Результаты экспериментальных испытаний устройства

Предлагаемый эксперимент направлен на оценку эффективности разработанного устройства. С этой целью будет выполняться регистрация фактической вместимости в различные временные интервалы. Полученные данные позволят оценить целостность колонки заряда и сформулировать обоснованные выводы (табл. 2).

Анализ данных, приведенных в таблице 2, подтверждает соответствие устройства поставленным целям. Непосредственно после заряжания скважины отклонение параметра вместимости от проектного значения достигает 7,3 %. По истечении 24 часов максимальное отклонение снижается до 3,1 %, при этом фиксируются скважины с полным соответствием проектному значению. Среднее значение отклонения составляет 1,07 %.

Указанные показатели свидетельствуют об эффективности применения разработанного устройства.

Выводы

1. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные подтверждают высокую эффективность разработанного устройства. Установлено, что по истечении 24 часов с момента заряжания колонка заряда сохраняет соответствие проектной вместимости. Средний показатель отклонения при этом составляет 1,07 %, что существенно ниже значений, зафиксированных в прошлом исследовании [10]. Таким образом, предлагаемый метод зарядки патронированных ЭВВ с использованием описанного устройства может быть рекомендован для промышленного применения в условиях, где

Таблица 2 / Table 2

**Изменение фактической вместимости в разный интервал времени /
Change in actual capacity over different time intervals**

Длина скважины $L_{скв}$, м	Высота столба воды L	Проектная длина заряда, $L_{зар}$, м	Вес заряда в скважине Q, кг	Время после зарядки								
				0 часов			6 часов			24 часа		
				$P_{факт}$, кг/м	$L_{зар}$, м	Δ, %	$P_{факт}$, кг/м	$L_{зар}$, м	Δ, %	$Ф_{акт}$, кг/м	$L_{зар}$, м	Δ, %
9,3	9,3	6,2	88	13,3	6,6	6,5	13,8	6,4	3,2	14,0	6,3	1,6
12,7	9,1	9,6	136	13,2	10,3	7,3	14,0	9,7	1,0	14,0	9,7	1,0
8,1	8,0	7,4	104	13,2	7,9	6,8	14,1	7,4	0,0	14,1	7,4	0,0
13,4	13	5,9	84	13,3	6,3	6,8	14,0	6,0	1,7	14,0	6,0	1,7
10,9	5,9	10,5	148	13,2	11,2	6,7	13,7	10,8	2,9	13,8	10,7	1,9
11,2	8,4	8,2	116	13,3	8,7	6,1	13,8	8,4	2,4	14,1	8,2	0,0
8,8	8,4	11	156	13,6	11,5	4,5	13,7	11,4	3,6	13,7	11,4	3,6
14	10,2	5,4	76	13,3	5,7	5,6	14,1	5,4	0,0	14,1	5,4	0,0
10,1	8,2	9,1	128	13,2	9,7	6,6	14,1	9,1	0,0	14,1	9,1	0,0
13,6	11,3	6,8	96	13,7	7,0	2,9	14,1	6,8	0,0	14,1	6,8	0,0
9,5	5,3	7,9	112	13,3	8,4	6,3	14,0	8,0	1,3	14,0	8,0	1,3
12	7,6	10,8	152	13,2	11,5	6,5	13,8	11,0	1,9	13,9	10,9	0,9
8,4	7,9	5,7	80	13,6	5,9	3,5	14,0	5,7	0,0	14,0	5,7	0,0
11,7	11,7	8,5	120	13,6	8,8	3,5	14,0	8,6	1,2	14,0	8,6	1,2
10,3	9,1	9,3	132	13,6	9,7	4,3	13,8	9,6	3,2	14,0	9,4	1,1
13,1	13,0	6,5	92	13,5	6,8	4,6	13,7	6,7	3,1	13,7	6,7	3,1
9,8	7,2	11	156	13,3	11,7	6,4	13,6	11,5	4,5	13,8	11,3	2,7
12,5	12,5	5,1	72	13,6	5,3	3,9	14,1	5,1	0,0	14,1	5,1	0,0
8,6	6,5	7,1	100	13,5	7,4	4,2	13,9	7,2	1,4	13,9	7,2	1,4
11	9,6	9,9	140	13,5	10,4	5,1	13,9	10,1	2,0	14,1	9,9	0,0

использование смесительно-зарядных машин невозможно или экономически нецелесообразно.

2. Несмотря на полученные положительные результаты, представленное исследование не исчерпывает всего спектра вопросов, связанных с применением разработанного устройства. Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение области экспериментальной апробации. В частности, требуется оценить эффективность предложенного метода при заряжании скважин других диаметров, а также на репрезентативной выборке с увеличением числа опытных скважин для повышения статистической достоверности результатов. Кроме того, перспективным направлением является проведение измерений скорости детонации сформированной колонки заряда, подобно исследованиям [13–15], что позволит установить количественную связь между целостностью заряда и его детонационными характеристиками.

3. Наряду с этим для комплексной оценки эффективности предлагаемого метода необходимо выполнить анализ качества взрывных работ путем прямого замера выхода негабаритных фракций после массового взрыва. Сопоставление доли негабарита при использовании разработанного устройства и при традиционных способах заряжания позволит подтвердить его технологическую целесообразность и ожидаемый экономический эффект за счет снижения затрат на последующее дробление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Швабенланд Е.Е. и др. Способ повышения качества подготовки пород к выемке при использовании эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах с высокими уступами. *Горная промышленность*. 2021; 6: 62-67. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021.
   Pytalev I.A., Domozhirov D.V., Shvabenland E.E. et al. A method for improving the quality of rock preparation for excavation using emulsion explosives in quarries with high benches. *Mining Industry.* 2021; (6): 62-67. (In Russ.). https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-62-67.
2. Miyakea A., Takaharaa K., Ogawaa T., et al. Influence of physical properties of ammonium nitrate on the detonation behaviour of ANFO. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2001; 14 (6): 533-538. https://doi.org/10.1016/S0950- 4230(01)00041-9.
3. Кутузов Б.Н. Справочник взрывника: Ч. 2: Техника, технология и безопасность взрывных работ. Москва, 2014: 304.
   Kutuzov B.N. Blaster's Handbook. Part 2: Techniques, Technology and Safety of Blasting Operations. Moscow, 2014: 304. (In Russ.).
4. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности. Москва, 2009: 670.
   Kutuzov B.N. Safety of Blasting Operations in Mining and Industry. Moscow, 2008: 670. (In Russ.).
5. Тухбатулин А.Р., Васянович Ю.А. Сравнительный анализ качества взрывных работ при разных методах зарядки в обводненных условиях (на примере Первореченского месторождения андезитов). *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (2): 12-18. https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-12-18.
   Tukhbatulin A.R., Vasyanovich Yu.A. Comparative analysis of the quality of blasting operations using different charging methods in water-bearing conditions (on the example of the Pervorechenskoye andesite deposit). *Mine Surveying and Subsoil Use.* 2025; 25 (2): 12-18. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-12-18.

6. Педан Н.Р. Применение взрывчатого вещества Гидронит-П в водонасыщенных скважинах на взрывном блоке. *Научный аспект*. 2023; 34 (12): 4252-4257.
Pedan N.R. Application of HydroNit-P explosive in water-saturated boreholes in a blast block. *Scientific Aspect.* 2023; 34 (12): 4252-4257. (In Russ.).
7. Педан Н.Р., Васянович Ю.А. Применение водоустойчивого взрывчатого вещества «Гидронит-П» в горной промышленности. *Взрывное дело*. 2024; 143 (100): 122-132.
Pedan N.R., Vasyanovich Yu.A. Application of water-resistant explosive "HydroNit-P" in the mining industry. *Blasting Technology.* 2024; 143 (100): 122-132. (In Russ.).
8. Фокин В.А. Распределение плотности эмульсионных взрывчатых веществ по высоте колонки скважинного заряда. *Известия вузов. Горный журнал*. 2007; 3: 89-94.
Fokin V.A. Density distribution of emulsion explosives along the height of a borehole charge column. *News of Higher Educational Institutions. Mining Journal.* 2007; (3): 89-94. (In Russ.).
9. Галимьянов А.А., Черских О.И., Рассказова А.В. и др. Методика обеспечения качества заряда наливного эмульсионного взрывчатого вещества в обводненных скважинах. *Уголь*. 2024; 1 (1176): 100-108. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-100-108.
Galimyanov A.A., Cherskikh O.I., Rasskazova A.V., et al. Methodology for ensuring the quality of bulk emulsion explosive charges in water-filled boreholes. *Coal*. 2024; 1 (1176): 100-108. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-100-108.
10. Тухбатулин А.Р., Васянович Ю.А. Исследование усадки патронированного ЭВВ в обводненных условиях при формировании колонки заряда. *Взрывное дело*. 2025; 149-106: 39-54.
Tukhbatulin A.R., Vasyanovich Yu.A. Investigation of the settlement of packaged explosives in water-bearing conditions during charge column formation. *Blasting Technology.* 2026; 149-106: 39-54. (In Russ.).
11. Самусев П.А., Новиньков А.Г., Протасов С.И. Определение дальности разлета отдельных кусков породы при взрывании скважинных зарядов рыхления. *Техника и технология горного дела.* 2023; 4 (23): 4-25. https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-4-25.
Samusev P.A., Novinkov A.G., Protasov S.I. Determination of the flight range of individual rock fragments during blasting of borehole loosening charges. *Technique and Technology of Mining.* 2023; 4 (23): 4-25. (In Russ.). https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-4-25.
12. Черских О.И., Галимьянов А.А., Корнеева С.И., Мишнев В.И. Уточненная формула для определения радиуса опасной зоны по разлету отдельных кусков горной массы при взрывании скважинных зарядов. Уголь. 2023; № 5 (1167): 50-54. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-50-54.
Cherskikh O.I., Galimyanov A.A., Korneeva S.I., Mishnev V.I. Refined formula for determining the radius of the danger zone from flyrock of individual rock mass pieces during blasting of borehole charges. *Coal.* 2023; 5 (1167): 50-54. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-50-54.
13. Mesec J., Zganec S., Kovac I. In-hole velocity of detonation (VOD) measurements as a framework for the selection type of explosive. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015; 25 (4): 675-680. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.024.
14. Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ. *Проблемы недропользования*. 2016; 4: 78-87.
Kutuev V.A., Menshikov P.V., Zharikov S.N. Analysis of methods for studying explosive detonation processes. *Subsoil Use Problems.* 2016; (4): 78-87. (In Russ.).
15. Галимьянов А.А., Герасимов Д.Е., Мишнев В.И. и др. Влияние параметров БВР на скорость детонации заряда взрывчатых веществ. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2022; 9; 268-274. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-268-274.
Galimyanov A.A., Gerasimov D.E., Mishnev V.I., et al. Influence of drilling and blasting parameters on the detonation velocity of explosive charges. *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences.* 2022; (9): 268-274. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-268-274.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артем Рустамович Тухбатулин –
аспирант кафедры горного дела, ФБГОУ ВО «Владивостокский государственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация; e-mail: zx365@yandex.ru

Юрий Анатольевич Васянович –
д-р техн. наук, профессор кафедры горного дела ФБГОУ ВО «Владивостокский государственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация; e-mail: vasyanovich_2011@mail.ru

Петр Сергеевич Таран –
генеральный директор ООО «Якутская взрывная компания», г. Спасск-Дальний, Российская Федерация; e-mail: taran@yvkdv.ru

ABOUT THE AUTHORS

Artem R. Tukhbatulin –
postgraduate student of the Department of Mining Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: zx365@yandex.ru

Yuri A. Vasyanovich –
Dr. Sci. (Eng.), Professor of Mining Engineering Department, Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: vasyanovich_2011@mail.ru

Petr S. Taran –
General Director of Yakutsk Explosive Company LLC, Spassk-Dalny, Russian Federation; e-mail: taran@yvkdv.ru

Критерии авторства:
А. Р. Тухбатулин – разработка концепции исследования, постановка целей и задач, проведение полевых исследований, сбор и анализ данных, подготовка текста статьи, включая описание методики, результатов и выводов; оформление таблиц, визуализация данных; Ю. А. Васянович – научное руководство исследованием, консультации по методологии и интерпретации данных, рецензирование и редактирование текста статьи, уточнение теоретической части; П. С. Таран – консультирование при разработке устройства, помощь в проведении исследования. Все авторы ознакомились с финальной версией статьи и одобрили ее для публикации.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 11.06.2026
Поступила после рецензирования: 24.08.2026
Принята к публикации: 05.09.2026

Contribution:
A. R. Tukhbatulin – development of the research concept, formulation of goals and objectives, conducting field research, data collection and analysis, preparation of the manuscript text, including description of methodology, results, and conclusions, design of tables and data visualization; Yu. A. Vasyanovich – scientific supervision of the research, consultations on methodology and data interpretation, review and editing of the manuscript, refinement of the theoretical framework; P. S. Taran – consultation on the development of the device, assistance in conducting the research.
All authors participated in the development of the research concept and formulation of its objectives.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 11.06.2026
Revised: 24.08.2026
Accepted: 05.09.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.233:622.235:624.191
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-56-64

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.233:622.235:624.191

Проходка горных выработок большого сечения буровзрывным методом в условиях многолетней мерзлоты способом сплошного забоя

В. Ф. Гутник[1]✉, А. Н. Анушенков[2]
[1]Акционерное общество «Моспроект-3», г. Москва, Российская Федерация
[2]Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация
✉ *Gutnik.vf@yandex.ru*

Резюме. В настоящее время ведется активное развитие транспортной инфраструктуры в отдаленных регионах Российской Федерации, в частности увеличение пропускной способности Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей. Для решения данной задачи необходимо сооружение новых тоннелей. Буровзрывные работы были и остаются одним из основных методов проходки горных выработок, а способ проходки имеет важное значение и определяет основные технико-экономические показатели проекта. Способ сплошного забоя (на полное сечение) по сравнению с уступным способом повышает скорость проходки за счет сокращения количества основных операций в цикле производства работ в контексте итогового доведения выработки до проектного сечения. Вместе с этим проходка тоннеля на полное сечение позволяет параллельно вести работы по возведению постоянной обделки на некотором отдалении от забоя. Эти факторы сокращают сроки строительства, соответственно, и себестоимость проекта в целом. При этом одним из основных условий, определяющих количественные и стоимостные показатели сокращения сроков и себестоимости строительства, является увеличение длины уходки забоя за один цикл буровзрывных работ. Увеличение длины разрабатываемой заходки является непростой задачей, так как при этом, как правило, уменьшается эффективность работы взрыва, выражающаяся в снижении коэффициента использования шпура. В данной статье представлена и подробно описана инновационная схема вруба и паспорта буровзрывных работ, которая позволяет эффективно вести проходку горных выработок большого сечения способом сплошного забоя в условиях многолетнемерзлых пород. Также приведена методика ее разработки, основанная на моделировании и экспериментальных испытаниях различных вариаций смоделированных схем в условиях строительства железнодорожного тоннеля, пролегающего в многолетней мерзлоте.

Ключевые слова: проходка, тоннель, способ сплошного забоя, многолетняя мерзлота, паспорт БВР, коэффициент использования шпура, скважина, вруб

Для цитирования: Гутник В.Ф., Анушенков А.Н. Проходка горных выработок большого сечения буровзрывным методом в условиях многолетней мерзлоты способом сплошного забоя. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 56-64. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-56-64.

Drilling and blasting of large-section mining workings in permafrost conditions by the solid failing method

V. F. Gutnik[1]✉, A. N. Anushenkov[2]
[1]JSC Mosproekt-3, Moscow, Russian Federation
[2]Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ *Gutnik.vf@yandex.ru*

Abstract. Transport infrastructure is currently being actively developed in remote regions of the Russian Federation, specifically increasing the capacity of the Trans-Siberian and Baikal-Amur Mainlines. To address this challenge, new tunnels must be constructed. Drilling and blasting have been and remain one of the primary methods for excavating mine workings, and the method of excavation is crucial and determines the key technical and economic indicators of a project. Compared to the bench method, continuous stoping (full-section tunneling) allows for increased speed by reducing the number of key operations in the work cycle, ultimately bringing the working to its design cross-section. Furthermore, full-section tunneling allows for parallel construction of a permanent lining at some distance from the working face. These factors reduce construction time and, consequently, the overall project cost. One of the

© Гутник В. Ф., Анушенков А. Н., 2026

key factors determining the quantitative and cost metrics for reducing construction time and costs is increasing the face length per drilling and blasting cycle. Increasing the length of the developed face is challenging, as it typically reduces blast efficiency, resulting in a decrease in blasthole utilization. This article presents and describes in detail an innovative cutting scheme and drilling and blasting protocols that enable efficient development of large-diameter mine workings using continuous face mining in permafrost conditions. It also presents a methodology for its development, based on modeling and experimental testing of various variations of the modeled schemes during the construction of a railway tunnel running through permafrost.

Keywords: driving, tunnel, continuous face method, permafrost, blasting pattern, utilization factor of blasthole, borehole, cut

For citation: Gutnik V.F., Anushenkov A.N. Drilling and blasting of large-section mining workings in permafrost conditions by the solid failing method. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (5): 56-64. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-56-64.

Введение

Проходка нового Дуссе-Алиньского тоннеля была начата со стороны Западного портала и производилась уступным способом: сначала калотта, затем штросса. Горно-геологические и горнотехнические характеристики многолетнемерзлых пород отличаются от их немерзлого состояния, и применение известных схем вруба и паспортов буровзрывных работ (БВР) не приносило желаемых результатов: коэффициент использования шпура (КИШ) был низким, оставались недоборы [1] и выход негабарита. Однако после многочисленных экспериментов была разработана оптимальная схема вруба[1], позволяющая эффективно вести проходку калотты с требуемым КИШ, на основании которой был составлен итоговый паспорт БВР.

Через некоторое время начата проходка со стороны Восточного портала, также уступным способом. При этом проектом организации строительства (ПОС) параллельно с ведением проходческих работ предусматривалось возведение постоянной обделки для сокращения сроков строительства и организации новых фронтов ведения работ, таких как устройство жесткого основания, верхнего строения пути (ВСП) и пр. Однако скорость возведения постоянной обделки (72 пог. м/мес) была выше, чем скорость проходки уступным способом. Из-за того что проходка велась интервально, 30 суток – проходка калотты (96,4 пог. м) и 25 суток – проходка штроссы (96,4 пог. м), средняя скорость проходки на полное сечение составила 96,4 / 55 · 30 = 52,58 пог. м/мес. По этой причине был произведен переход на проходку способом сплошного забоя, так как по сравнению с уступным способом итоговая скорость проходки выше и составляет 58 пог. м/мес при проектной длине заходки – 2 пог. м. При этом данная скорость проходки по-прежнему не обеспечивала требуемые темпы по сооружению постоянной обделки.

Таким образом, возникла необходимость в увеличении скорости проходки путем увеличения длины разрабатываемой заходки. При увеличении длины заходки требуется большее количество одновременно заряжаемого взрывчатого вещества (ВВ), соответственно, увеличивается сейсмическая нагрузка на действующий тоннель, поэтому было решено провести горно-экологический мониторинг [2, 3]. Рассматривались различные методики мониторинга [4–6], по итогу проведения получено одобрение на увеличение длины заходки.

Как и в случае с проходкой калотты, известные схемы вруба[2],[3],[4] не приносили желаемых результатов при увеличении длины заходки, КИШ был неудовлетворительным (0,6–0,75), и по аналогии [7] были начаты экспериментальные испытания различных схем вруба для проходки тоннеля способом сплошного забоя.

Цель исследований: разработка и внедрение в производство схемы вруба и паспорта буровзрывных работ, которые позволят эффективно вести проходку горных выработок большого сечения в условиях многолетнемерзлых пород способом сплошного забоя, заходками длиной 4–6 пог. м при удовлетворительном значении КИШ.

Задачи исследования:

1. На основе экспериментальных испытаний известных схем вруба определить схему-прототип.
2. На основе схемы-прототипа выполнить моделирование новой схемы вруба, подходящей под заданные параметры.
3. Провести испытания смоделированной схемы вруба с последующей ее корректировкой до получения положительного результата.
4. На основе окончательной схемы вруба, показавшей положительный результат, составить и экспериментально испытать полный паспорт БВР для проходки способом сплошного забоя с последующей корректировкой до получения положительного результата.

Расположение и характеристика района объекта исследования

Действующий Дуссе-Алиньский тоннель находится на 3382–3384-м километрах БАМа, проходит под Дуссе-Алиньским хребтом. Местом перевального 1807-метрового тоннеля было выбрано седло Солони-Черт. Обделка тоннеля на всем его протяжении была выполнена из монолитного бетона марки М200, что соответствует, согласно действующим в настоящее время нормам, классу В15. Внутреннее очертание обделки – сводчатое с прямыми стенами.

Слева от оси тоннеля расположена еще одна выработка – дренажный коллектор. Расстояние между осями коллектора и тоннеля составляет около 8,5 м. Длина коллектора– 1945,3 м. Поперечное сечение коллектора имеет либо подковообразное сечение (в этом случае обделка выполнена из бетонных блоков размером 200 × 200 × 200 мм), либо сечение с вер-

[1]Патент РФ № 2852813 C1. Гутник В.Ф., Анушенков А.Н., Вохмин С.А., Урбаев Д.А. Схема клинощелевого вруба для многолетнемерзлых пород, опубл. 16.12.2025.

[2]Патент РФ № 2081392 C1, Андриевский А.П. Способ образования врубовой полости, опубл. 10.06.1997.

[3]Патент РФ 146195 U1, Масаев Ю.А., Стафеев А.А. Комбинированный призматический вруб, опубл. 10.10.2014.

[4]Патент РФ 2646152 C2, Масаев Ю. А., Копытов А. И., Масаев В. Ю. Схема взрывной отбойки забоя удароопасных горных пород, опубл. 01.03.2018.

тикальными стенами и пологим сводом (обделка выполнена из монолитного бетона). Обделка соответствовала классу не ниже В10.

Географическое положение тоннеля – центральная часть Хингано-Буреинского нагорья, охватывающая большую часть бассейна р. Бурея. Рельеф района проектирования – горный. Преобладают горы массивных очертаний с выположенными куполовидными водоразделами и крутыми, иногда обрывистыми в основании склонами, глубоко расчлененными узкими трапециевидными речными долинами.

Действующий (существующий) и проектируемый тоннели пересекают Буреинский хребет. Буреинский хребет, простирается с юго-запада на северо-восток. Его ширина в некоторых местах достигает 80 км, а наивысшая точка над уровнем моря – 2 167 м.

Район занимает промежуточное положение между двумя областями с совершенно различными физико-географическими условиями: влажными прибрежными районами Тихого океана – на востоке и континентальными пространствами Восточной Сибири – на западе.

В связи с этим формирование климата происходит под воздействием как океанических, так и континентальных факторов, а потому отличается резко выраженными чертами континентальности и в то же время имеет муссонный характер.

Среднегодовая многолетняя температура воздуха составляет -3,3 °С, при абсолютном минимуме -52,2 °С (мст. Чекунда) и -1,0 °С при абсолютном минимуме -48,1 °С (мст. Урми). Самый холодный месяц – январь, средняя температура составляет -31,8 °С (мст. Чекунда) и -24,3 °С (мст. Урми).

Наиболее теплый месяц – июль со средней температурой 19,3 °С и абсолютной максимальной 39,6 °С (мст. Чекунда) и со средней температурой 19,0 °С и абсолютной максимальной 38,6 °С (мст. Урми). Продолжительность безморозного периода в среднем 108 дней (мст. Чекунда) и 96 дней (мст. Урми).

Западный портал расположен на расстоянии 193 м от существующего пути. Проектируемый тоннель выходит на параллельное направление с существующим в 32 м от него. Предусматривается устройство выемок с Западного и Восточного порталов глубиной 20 и 11 м соответственно. Тоннель устраивается с максимальным уклоном 15,1 ‰. Разница высот порталов составляет 29,2 м.

Горно-геологические и иные характеристики проектируемого тоннеля (объекта исследований) приведены в предыдущем исследовании [7].

Методика исследования

Методика исследования заключается в моделировании новой схемы вруба на основании анализа известных схем, последовательных опытных взрываниях смоделированной схемы вруба с последующей ее корректировкой в зависимости результатов взрыва, в отличие от других методик [8, 9], основанных на расчете различных параметров [10, 11].

В качестве прототипа была выбрана схема, показавшая положительный результат при проходке калотты [2, 11]. Поскольку длина уходки данной схемы варьируется в пределах 1766–4340 мм в зависимости от диаметра разгрузочных незаряжаемых скважин (76–125 мм), без учета КИШ, для заданных параметров проходки способом сплошного забоя, заходками по 4000–6000 мм, она не подходит. Этим обусловлена необходимость разработки новой схемы.

Принципы моделирования

При составлении модели были применены следующие принципы:

1. Так как габариты разрабатываемой заходки зависят от диаметра разгрузочных незаряжаемых скважин, за основу при составлении модели был взят средний диаметр скважины в пределах заданного интервала (76–125 мм), равный 100 мм.

2. Как видно на схеме вруба, взятой за прототип [7, рис. 5], пробивного расстояния в 400 мм между забоями шпуров IV группы вкупе с дополнительной обнаженной поверхностью в виде разгрузочной незаряжаемой скважины достаточно для эффективного разрушения рассматриваемого породного массива.

3. Так как с увеличением длины заходки эффективность работы шпуров в забойной зоне уменьшается, а для качественной работы вруба необходимо добиться гарантированного образования первоначальной щелевидной полости, необходимо применение дополнительных шпуров в виде горизонтального и вертикального клина.

4. Для оптимального распределения серий замедления и удобства формирования взрывной цепи предпочтительная форма врубовой полости должна быть подобна форме разрабатываемой выработки.

5. Для эффективной работы второго и третьего горизонтального клина в связи с увеличением длины разрабатываемой заходки необходимо добавить разгрузочные незаряжаемые скважины так, чтобы они располагались между забоями данных групп шпуров либо в непосредственной близости от них.

6. В связи с увеличением длины разрабатываемой заходки расстояния между устьями и забоями шпуров следует уменьшить для обеспечения требуемого пробивного действия шпуров.

7. Каждую группу шпуров следует взрывать отдельной серией с таким интервалом замедления, который обеспечивает разрушающую работу шпуров предыдущей серии. Симметричные группы шпуров следует взрывать последовательно.

Итоговая модель схемы вруба

После моделирования [12] различных схем вруба, их испытаний и корректировок была разработана схема, показавшая наибольшую эффективность. По причине зависимости габаритов врубовой полости от диаметра разгрузочных скважин размеры указаны в буквенном обозначении. Описание данной разработанной схемы представлено ниже.

Схема поясняется графически (рис. 1–4).

Схема клинощелевого вруба большого сечения для многолетнемерзлых пород содержит прямой, вертикальный клиновой и горизонтальный клиновой врубы. Вертикальный клиновой вруб образован четырьмя парами шпуров на вертикальной оси в центральной части вруба, пробуренными на всю длину разрабатываемой заходки наклонно к горизонтальной плоскости забоя, в центре каждой пары шпуров пробурена одна незаряжаемая разгрузочная скважина. Прямой вруб сформирован шпурами, пробуренными на всю длину разрабатываемой заходки, перпендикулярно к плоскости забоя, расположенными по вертикальной оси в центральной части вруба и симметрично друг другу по краям вруба. Горизонтальный клиновой вруб выполнен из трех групп шпуров, пробуренных наклонно к вертикальной плоскости забоя,

каждая из которых образована парами шпуров, симметрично расположенными относительно вертикальной оси вруба, при этом расстояние между шпурами каждой пары уменьшается от устья к забою. Длина всех шпуров и угол наклона шпуров вертикального и горизонтального клинового вруба определяются габаритами разрабатываемой заходки, которые прямо пропорционально зависят от диаметра разгрузочных незаряжаемых скважин.

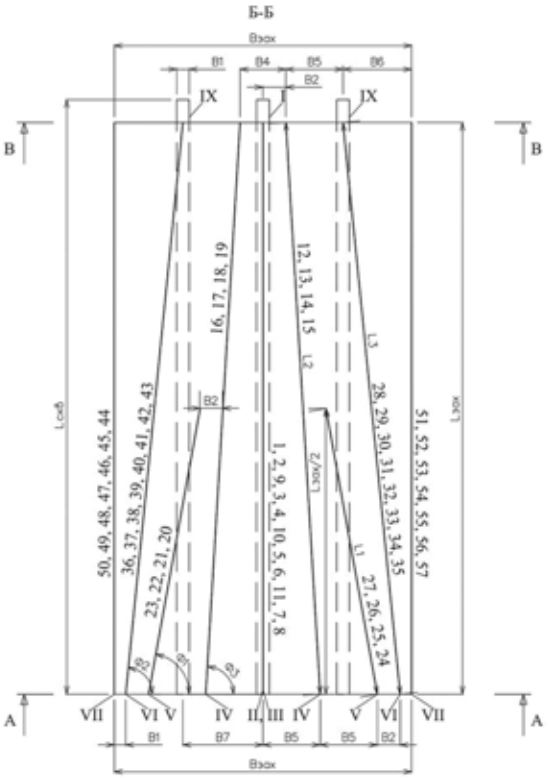


Рис. 1. **Продольный разрез по шпурам в горизонтальной плоскости /**
Fig. 1. **Longitudinal section along the boreholes in the horizontal plane**

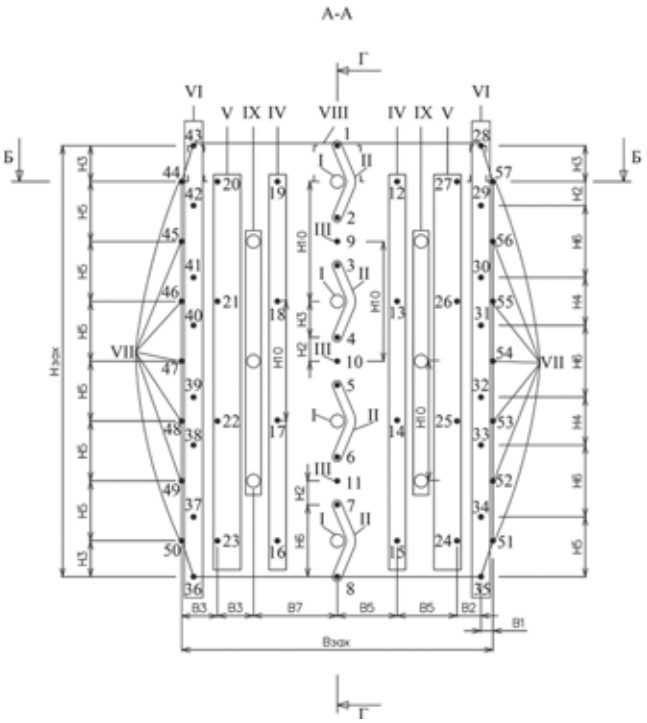


Рис. 2. **Поперечный разрез по устьям шпуров /**
Fig. 2. **Cross-section along the mouths of the boreholes**

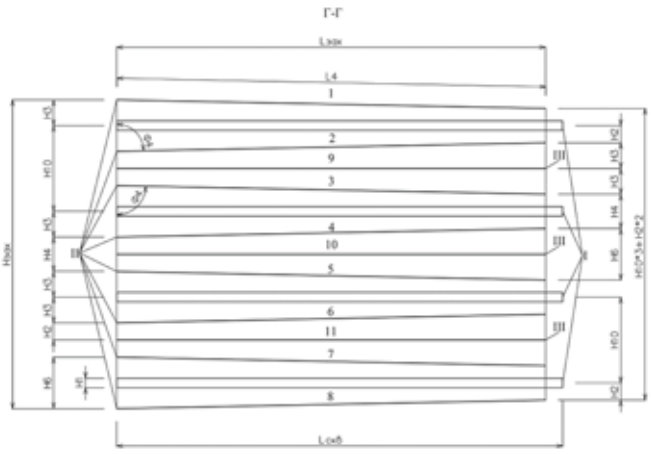


Рис. 3. **Продольный разрез по шпурам в вертикальной плоскости /**
Fig. 3. **Longitudinal section along the boreholes in the vertical plane**

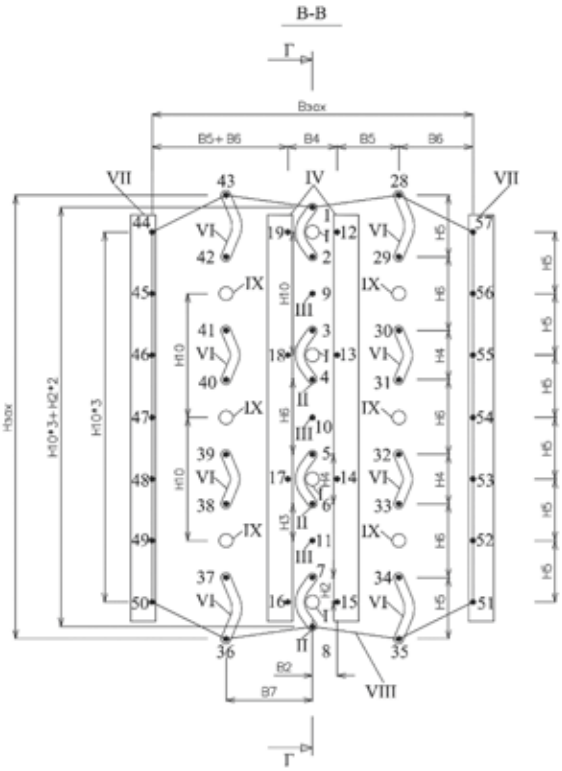


Рис. 4. **Поперечный разрез по забоям шпуров /**
Fig. 4. **Cross-section of the borehole faces**

На рисунках 1–4 обозначено: $L_{зах}$ – длина заходки; $L_{зах/2}$ – половина длины заходки; $L_{скв}$ – длина скважины; L_1, L_2, L_3, L_4 – длина шпуров; $H_{зах}$ – высота заходки; H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_{10} – расстояние между забоями и устьями шпуров и скважин по высоте заходки; $B_{зах}$ – ширина заходки; B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7 – расстояние между забоями и устьями шпуров и скважин по ширине заходки; $Ф_1$, $Ф_2$, $Ф_3$, $Ф_4$ – угол забуривания шпуров; I – центральные разгрузочные незаряжаемые скважины, выполняющие роль дополнительной обнаженной поверхности, имеющие длину $L_{скв}$; II – шпуры вертикального клинового вруба, создающие первоначальную щелевидную вертикально расположенную полость, имеющие длину L_4; III – шпуры прямого вруба, дорабатывающие первоначальную щелевидную полость по вертикальной оси, имеющие длину $L_{зах}$; IV – шпуры горизонтального клинового вруба, расширяющие первоначальную вертикально расположен-

ную щелевидную полость в горизонтальном направлении, имеющие длину L_2; V – шпуры горизонтального клинового вруба, создающие малую клиновидную полость, имеющие длину L_1; VI – шпуры горизонтального клинового вруба, создающие большую клиновидную полость, имеющие длину L_3; VII – шпуры прямого вруба, образующие конечную врубовую полость, имеющие длину $L_{зах}$; VIII – контур врубовой полости по высоте ($H_{зах}$) и ширине ($B_{зах}$); IX – боковые разгрузочные скважины, выполняющие роль дополнительной обнаженной поверхности, имеющие длину $L_{скв}$; 1–57 – порядковые номера шпуров. Скважины I и IX группы имеют одинаковый диаметр.

При этом расстояние между забоями и устьями шпуров по ширине заходки (B_1–B_7) и расстояние между забоями и устьями шпуров по высоте заходки (H_1–H_6, H_{10}) зависят от диаметра разгрузочных скважин, по следующему принципу: один диаметр скважины равен расстоянию B_1 и расстоянию H_1; два диаметра скважины равны расстоянию B_2 и расстоянию H_2 и так далее. К примеру, при бурении скважины $Ø_{скв}$ = 100 мм B_1 = 100 мм, H_1 = 100 мм; пять диаметров скважины $Ø_{скв}$ = 100 мм будут соответствовать размерам B_5 = 500 мм, H_5 = 500 мм.

Данная зависимость выражается следующим соотношением

$$n \cdot Ø_{скв} = B_n = H_n,$$

где n – число, обозначающее кратность диаметров скважины, n = 1–7, 10; B_n – расстояние между устьями и забоями шпуров и скважин по ширине заходки для n-кратной скважины; H_n – расстояние между устьями и забоями шпуров и скважин по высоте заходки для n-кратной скважины.

Зависимость размеров B_1–B_7 и H_1–H_6, H_{10}, используемых на рисунках 1–4, от диаметра разгрузочных незаряжаемых скважин приведена в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Соотношение размеров диаметра разгрузочных незаряжаемых скважин, ширины (B_n) и высоты (H_n) /
The ratio of the dimensions of the diameter of unloading non-recharging wells, width (B_n) and height (H_n)

Диаметр скважины	B_n	H_n
$1 \cdot Ø_{скв}$	B_1	H_1
$2 \cdot Ø_{скв}$	B_2	H_2
$3 \cdot Ø_{скв}$	B_3	H_3
$4 \cdot Ø_{скв}$	B_4	H_4
$5 \cdot Ø_{скв}$	B_5	H_5
$6 \cdot Ø_{скв}$	B_6	H_6
$7 \cdot Ø_{скв}$	B_7	-*
$10 \cdot Ø_{скв}$	-**	H_{10}

* расстояние по высоте H_7 равно сумме расстояний H_3 и H_4;

** расстояние по ширине B_{10} равно сумме расстояний B_3 и B_7 либо B_5 и B_5.

Схема клинощелевого вруба большого сечения для многолетнемерзлых пород включает в себя вертикальный клиновой вруб, который выполнен из II группы шпуров, прямой вруб, который состоит из III и VII группы шпуров, горизонтальный клиновой вруб, состоящий из IV, V, VI групп шпуров, а также центральные незаряжаемые разгрузочные скважины I группы, расположенные в центральной части вруба, и боковые незаряжаемые разгрузочные скважины IX группы, расположенные между IV и V группой шпуров.

Клинощелевой вруб большого сечения для многолетнемерзлых пород формируется следующим образом:

1. Вертикальный клиновой вруб состоит из четырех пар шпуров с 1-го по 8-й (II группа шпуров), которые создают первоначальную щелевидную полость (рис. 1–4). Эти шпуры пробуриваются на длину L_4 (рис. 3), доходящую по нормали до длины заходки $L_{зах}$, под углом $Ф_4$ к горизонтальной плоскости забоя в центральной части вруба, по вертикальной оси. В центре каждой пары шпуров пробуривается одна разгрузочная незаряжаемая скважина (I группа скважин) Ø = 76–125 мм, длиной $L_{скв}$, которая на 5 % превышает длину заходки $L_{зах}$ (рис. 1, 3), выполняющая роль дополнительной обнаженной поверхности в системе вруба. Шпуры с 1-го по 8-й взрываются в первую очередь. Угол $Ф_4$ формируется исходя из габаритов разрабатываемой заходки, при этом расстояние между шпурами каждой пары уменьшается от устья к забою.

2. Шпуры прямого вруба с 9-го по 11-й (III группа шпуров) взрываются во вторую очередь и дорабатывают первоначальную щелевидную полость в вертикальном направлении (рис. 1–4). Шпуры пробуриваются на всю длину заходки $L_{зах}$, перпендикулярно плоскости забоя, в центральной части вруба по вертикальной оси. Они расположены между четырьмя парами шпуров, образованных 1-м и 2-м, 3-м и 4-м, 5-м и 6-м, 7-м и 8-м шпурами вертикального клинового вруба соответственно.

3. На расстоянии B_5 от вертикальной оси вруба в обе стороны пробуриваются четыре пары шпуров горизонтального клинового вруба с 12-го по 19-й (IV группа шпуров), расширяющие первоначальную щелевидную полость в горизонтальном направлении (рис. 1, 2 и 4), под углом $Ф_3$ к вертикальной плоскости забоя, длиной L2, доходящей по нормали до длины заходки $L_{зах}$. Расстояние между забоями шпуров равно расстоянию B_4 (рис. 2, 4).

Шпуры с 12-го по 15-й взрываются в третью очередь, с 16-го по 19-й – в четвертую очередь. Угол $Ф_3$ формируется исходя из габаритов разрабатываемой заходки, при этом расстояние между шпурами каждой пары уменьшается от устья к забою.

4. На расстоянии $B_5 + B_5$ от вертикальной оси вруба в обе стороны пробуриваются четыре пары шпуров горизонтального клинового вруба с 20-го по 27-й (рис. 1, 2) под углом $Ф_1$ к вертикальной плоскости забоя, длиной L_1 так, чтобы образовать малый клин (V группа шпуров), длина которого по нормали доходит до половины длины разрабатываемой заходки $L_{зах}/2$ (рис. 1). Расстояние между забоями шпуров V группы и стенками шпуров IV группы составляет B_2 (рис. 1). Шпуры с 20-го по 23-й взрываются в пятую очередь, шпуры с 24-го по 27-й – в шестую очередь, образуя малую клиновидную полость. Угол $Ф_1$ формируется исходя из габаритов разрабатываемой заходки, при этом расстояние между шпурами каждой пары уменьшается от устья к забою.

5. На расстоянии $B_5 + B_5 + B_2$ от вертикальной оси вруба в обе стороны пробуриваются восемь пар шпуров горизонтального клинового вруба с 28-го по 43-й (рис. 1, 2 и 4) под углом $Ф_2$ к вертикальной плоскости забоя, длиной L_3

так, чтобы образовать большой клин (VI группа шпуров), длина которого по нормали достигает всей длины разрабатываемой заходки $L_{зах}$. Расстояние между забоями шпуров и вертикальной осью вруба равно расстоянию B_7 (рис. 1, 4). Причем между забоями шпуров IV группы, а именно 29–30-м, 31–32-м, 33–34-м, 37–38-м, 39–40-м, 41–42-м, расположены шесть боковых незаряжаемых разгрузочных скважин Ø = 76–125 мм (IX группа скважин), по три с каждой стороны от вертикальной оси вруба (рис. 4). Шпуры с 28-го по 35-й взрываются в седьмую очередь, шпуры с 36-го по 43-й взрываются в восьмую очередь, образуя большую клиновидную полость. Угол $Ф_2$ формируется исходя из габаритов разрабатываемой заходки, при этом расстояние между шпурами каждой пары уменьшается от устья к забою.

6. На расстоянии B_1 от устья VI группы шпуров в обе стороны от вертикальной оси вруба пробуриваются семь пар шпуров прямого вруба с 44-й по 57-й (рис. 1, 2 и 4), перпендикулярно плоскости забоя длиной $L_{зах}$ (VII группа шпуров). Шпуры с 44-го по 50-й взрываются в девятую очередь, шпуры с 51-го по 57-й взрываются в десятую очередь, образуя конечную врубовую полость длиной $L_{зах} \cdot 0,9$ (с учетом КИШ = = 0,9), шириной $B_{зах}$ и высотой $H_{зах}$.

Соотношение сторон $B_{зах} : H_{зах} : L_{зах}$ находится в диапазоне 1 : 1,385 : (1,92÷2,31) соответственно (далее – соотношение сторон). Наибольшую эффективность показали интервалы замедления между сериями короткозамедленного взрывания (КЗВ) не менее 250 мс.

Результаты испытаний смоделированной схемы вруба

Результаты испытаний приведены для схемы вруба (рис. 1–4) со следующими параметрами: $Ø_{скв}$ = 100 мм, $L_{скв}$ = = 5 250 мм, $L_{зах}$ = 5 000 мм.

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики шпуровых зарядов / Characteristics of blasthole charges

Очередность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					На шпур	На серию
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	0	8	5 001	3,9	31,2
2	9, 10, 11	250	3	5 000	3,9	11,7
3	12, 13, 14, 15	500	4	5 011	3,6	14,4
4	16, 17, 18, 19	750	4	5 011	3,6	14,4
5	20, 21, 22, 23	1 000	4	2 540	1,8	7,2
6	24, 25, 26, 27	1 250	4	2 540	1,8	7,2
7	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35	1 500	8	5 025	3,6	28,8
8	36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	1 750	8	5 025	3,6	28,8
9	44, 45, 46, 47, 48, 49, 50	2 000	7	5 000	3,4	23,8
10	51, 52, 53, 54, 55, 56, 57	2 250	7	5 000	3,4	23,8
Итого расход ВВ, кг		На 1 пог. м – 41,36		На 1 м³ - 1,4		Всего – 191,3

Результаты пробных взрывов представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты пробных взрывов / Results of test explosions

№ взрыва	КИШ	Длина уходки, мм	Коэфф. крепости породы по шкале М. М. Протодьяконова, f
1	0,93	4 650	7, 8
2	0,95	4 750	7, 8
3	0,92	4 600	7, 8
4	0,94	4 700	7, 8
5	0,97	4 850	7,8
6	0,91	4 550	7,8
7	0,95	4 750	7,8

Помимо этого, данная схема была испытана с различными диаметрами разгрузочных незаряжаемых скважин (Ø = 76–125 мм) при соблюдении заданного соотношения сторон. Значение КИШ находилось в интервале 0,89–0,98.

Диапазон габаритов врубовой полости в зависимости от диаметра скважин приведен в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Диапазон габаритов врубовой полости / Range of cutting cavity dimensions

Ø скважины	$B_{зах}$, мм	$H_{зах}$, мм	$L_{зах}$, мм	
76	1 976	2 736	3 794	4 565
125	3 250	4 500	6 240	7 508

Итоговый результат проведенных испытаний

После успешных экспериментальных испытаний, схема вруба (рис. 1–4) в породах с коэффициентом крепости по М. М. Протодьяконову f = 7–8 и использованием патронированного аммонита № 6ЖВ в качестве взрывчатого вещества (ВВ), марка детонатора – «Искра-Ш» [13], была принята в работу.

Полная схема паспорта БВР на проходку подковообразной горной выработки площадью S = 71 м² методом сплошного сечения (рис. 5, 6) включает в себя:

– группу врубовых шпуров и скважин – I;
– первый контур отбойных шпуров – II;
– второй контур отбойных шпуров – III;
– третий контур отбойных шпуров – IV;
– четвертый контур отбойных шпуров – V;
– пятый контур отбойных шпуров – VI;
– шестой контур отбойных шпуров – VII;
– оконтуривающие шпуры – VIII (устья шпуров располагаются на расстоянии 250 мм от контура выработки);
– полозовые шпуры – IX, предназначены для выравнивания подошвы выработки; шпуры 135-й и 144-й забуриваются под углом 93˚ относительно горизонтальной и вертикальной оси тоннеля, шпуры с 136-го по 143-й забуриваются под углом 93˚ относительно горизонтальной оси тоннеля и 90˚ относительно вертикальной оси;
– разгрузочные шпуры – X, L = 5000 мм, выполняют роль дополнительной обнаженной поверхности, располагаются между шпурами VIII группы.

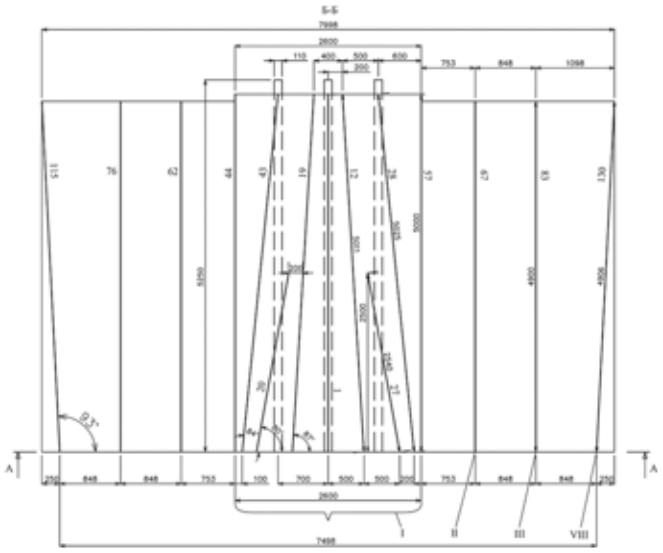


Рис. 5. **Продольный разрез по шпурам в горизонтальной плоскости /**
Fig. 5. **Longitudinal section along the boreholes in the horizontal plane**

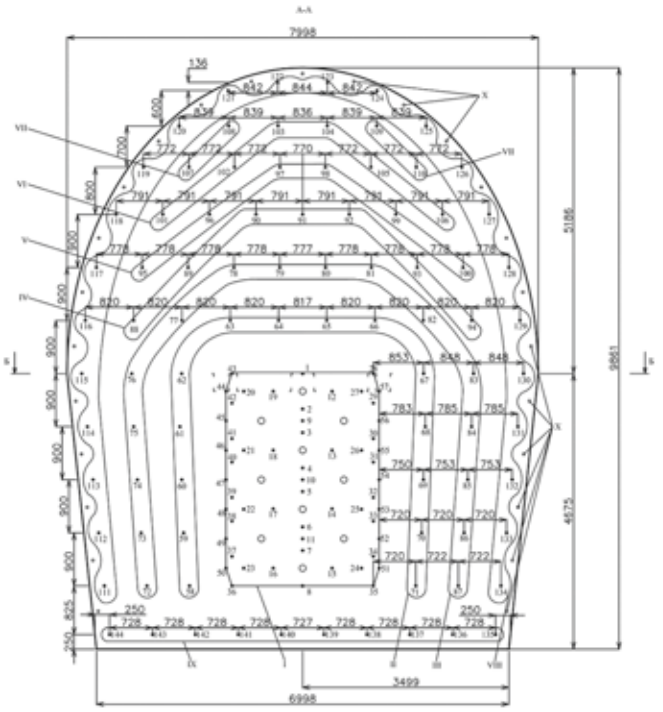


Рис. 6. **Поперечный разрез по устьям шпуров /**
Fig. 6. **Cross-section along the mouths of the boreholes (/)**

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 5.

Ввиду того что количество серий замедления детонаторов «Искра-Ш» ограничено 51 разновидностью, пришлось уменьшить минимальный интервал замедления с 250 до 150 мс. В противном случае серий замедления не хватает для отработки всей схемы (рис. 5, 6). В этом варианте в породах с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодьяконова f = 7–8, результаты пробных взрывов приведены в таблице 6.

Таблица 5 / Table 5

Характеристики шпуровых зарядов /
Characteristics of blasthole charges

Очередность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					На шпур	На серию
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	0	8	5 001	3,9	31,2
2	9, 10, 11	150	3	5 000	3,9	11,7
3	12, 13, 14, 15	300	4	5 011	3,6	14,4
4	16, 17, 18, 19	450	4	5 011	3,6	14,4
5	20, 21, 22, 23	600	4	2 540	1,8	7,2
6	24, 25, 26, 27	750	4	2 540	1,8	7,2
7	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35	1 000	8	5 025	3,6	28,8
8	36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	1 250	8	5 025	3,6	28,8
9	44, 45, 46, 47, 48, 49, 50	1 500	7	5 000	3,4	23,8
10	51, 52, 53, 54, 55, 56, 57	1 750	7	5 000	3,4	23,8
11	58, 59, 60, 61, 62, 63, 64	2 000	7	4 900	3,2	22,4
12	65, 66, 67, 68, 69, 70, 71	2 250	7	4 900	3,2	22,4
13	72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79	2 500	8	4 900	3,2	25,6
14	80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87	3 000	8	4 900	3,2	25,6
15	88, 89, 90, 91, 92, 93, 94	3 500	7	4 900	3,1	21,7
16	95, 96, 97, 98, 99, 100	4 000	6	4 900	3,1	18,6
17	101, 102, 103, 104, 105, 106	4 500	6	4 900	3	18
18	107, 108, 109, 110	5 000	5	4 900	2,8	14
19	111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118	6 000	8	4 906	2,4	19,2
20	119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126	7 000	8	4 906	2,4	19,2
21	127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134	8 000	8	4 906	2,4	19,2
22	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143	9 000	9	4 906	2,6	23,4
23	135, 144	10 000	2	4 908	2,6	5,2
Итого расход ВВ, кг		На 1 пог. м – 96,38		На 1 м³ – 1,36		Всего – 445,8

Таблица 6 / Table 6

Результаты пробных взрывов / Results of test explosions

№ взрыва	КИШ	Длина уходки, мм	Коэфф. крепости породы по шкале М. М. Протодьяконова, f
1	0,90	4 410	7–8
2	0,93	4 557	7–8
3	0,91	4 459	7–8
4	0,92	4 508	7–8
5	0,91	4 459	7–8
6	0,90	4 410	7–8
7	0,94	4 606	7–8

При применении данной схемы (рис. 5, 6) в породах с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодьяконова $f = 9–10$ возникла необходимость применения более мощного типа ВВ [14] на врубовой группе шпуров (I) по причине того, что используемый аммонит № 6ЖВ перестал обеспечивать требуемый КИШ. В качестве более мощного ВВ был использован аммонал-200 [15], в том же количестве: 191,3 кг. Остальные шпуры были заряжены аммонитом № 6ЖВ в том же количестве: 254,5 кг.

Итоги испытаний этой схемы показали результаты, аналогичные приведенным в таблице 6: средний КИШ составил 0,91, средняя длина уходки забоя за один цикл работ – 4 459 мм. Время выполнения одного цикла работ составило 45 ч. Среднемесячная скорость проходки составила $(30 + 31) / 2 \cdot 24 / 45 \cdot 4{,}459 = 72{,}53$ пог. м/мес.

Заключение

1. В результате выполненного исследования разработана инновационная схема вруба (рис. 1–4), позволяющая эффективно образовывать врубовую полость большого сечения в условиях многолетнемерзлых пород с категорией крепости по М. М. Протодьяконову $f = 7–10$.

2. На основании разработанной схемы вруба и выпускаемого ассортимента серий замедления неэлектрической системы инициирования повышенной безопасности «Искра-Ш» составлена полная схема паспорта БВР (рис. 5, 6) на проходку горной выработки большого сечения способом сплошного забоя.

3. Разработанная схема вруба (рис. 1–4) может быть использована для проходки широкого диапазона горных выработок, а также на предприятиях с различной технологической оснащенностью, обусловленной наличием подходящей буровой техники и бурового инструмента, из-за зависимости габаритов разрабатываемой заходки от диаметра разгрузочных незаряжаемых скважин.

Выводы

1. Применение результатов исследования позволило увеличить скорость проходки железнодорожного тоннеля способом сплошного забоя с 58 до 72,5 пог. м/мес.

2. Результаты исследований могут быть применены при сооружении горных выработок большого сечения методом БВР в северных регионах, где породы находятся в многолетнемерзлом состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гутник В.Ф. Анализ применения горного способа при сооружении подземных транспортных коммуникаций. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2025; 2 (168): 131-143. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-2-131-143.
   Gutnik V.F. Analysis of the application of the mining method in the construction of underground transport communications. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University.* 2025; 2 (168): 131-143. (In Russ.). https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-2-131-143.
2. Безродный К.П., Лебедев М.О. Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа. *Науковедение*. 2014; 5 (24): 21.
   Bezrodny K.P., Lebedev M.O. Mining-environmental monitoring during the construction and operation of transport tunnels in the North Caucasus. *Naukovedenie.* 2014; 5 (24): 21. (In Russ.).
3. Bao X., Zhang W., Zhao S., et al. Study on the influence of the blasting of preceding tunnel on the pre-penetration surrounding rock in succeeding tunnel with small clear distance. *Shock Vib*. 2022. https://doi.org/10.1155/ 2022/5181154.
4. Huo X., Shi X., Qiu X., et al. A study on raise blasting and blast-induced vibrations in highly stressed rock masses. *Tunn*. *Undergr*. *Sp*. *Technol*. 2022; 123: 104407. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104407.
5. Ji L., Zhou C., Lu S., et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a Large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting. *Rock Mech*. *Rock Eng*. 2021; 54: 6393–6411. https://doi.org/10.1007/s00603-021-02630-9.
6. Ji L., Zhou C., Lu S., et al. Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel. *Int*. *J. Rock Mech. Min. Sci.* 2021; 147: 104882. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104882.
7. Гутник В.Ф., Анушенков А.Н., Вохмин С.А. и др. Повышение эффективности буровзрывных работ при проходке горных выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (5): 26-34. https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-26-34.
   Gutnik V.F., Anushenkov A.N., Vokhmin S.A., et al. Increasing the efficiency of drilling and blasting operations in driving large cross-section mining in permafrost conditions. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2025; 25 (5): 26-34. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-26-34.
8. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К. и др. Обзор существующих методик расчета параметров зон разрушения породного массива. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; 1-1. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=19369.
   Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K. et al. Review of existing methods for calculating the parameters of rock mass destruction zones. *Modern problems of science and education.* 2015; 1-1. (In Russ.). URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=19369.
9. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К. и др. Расчет конструкции прямого призматического вруба. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; 1-1. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=17267.
   Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K., et al. Calculation of the design of a straight prismatic cut. *Modern problems of science and education.* 2015; 1-1. (In Russ.). URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=17267.
10. Курчин Г.С., Кирсанов А.К., Грибанова Д.А. Методика расчета паспорта буровзрывных работ при проходке горизонтальных горных выработок. *Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: мат-лы I Межд. науч. конф. (г. Казань, май 2015 г.)*. Казань, 2015: 19-25. URL: https://moluch.ru/conf/earth/archive/161/7899.

Kurchin G.S., Kirsanov A.K., Gribanova D.A. Methodology for calculating the passport of drilling and blasting operations during the development of horizontal mine workings. *Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: Proc. I Intern. scientific conf. (Kazan, May 2015).* Kazan, 2015: 19-25. (In Russ.). URL: https://moluch.ru/conf/earth/archive/161/7899.

11. Ремизов А.В., Прокопов А.Ю. Анализ эффективности методов проектирования паспорта буровзрывных работ при проходке выработок. *Известия Тульского государственного университета*. Науки о Земле. 2024; 1: 335-343.
Remizov A.V., Prokopov A.Yu. Analysis of the efficiency of methods for designing drilling and blasting operations passports during mine development. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences.* 2024; 1: 335-343. (In Russ.).
12. Шульгин П.Н. Обоснование новой методики проектирования паспортов БВР с использованием ЭВМ. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2016; 4 (47): 27-32.
Shulgin P.N. Justification of a new methodology for designing drilling and blasting operations passports using a computer. *Collection of scientific papers of Donbass State Technical University.* 2016; 4 (47): 27-32. (In Russ.).
13. Кондратьев С.А., Поздняков С.А., Иванов А.С. и др. Современные средства инициирования АО «НМЗ «ИСКРА». *Взрывное дело*. 2019; 123-80: 136-143.
Kondratyev S.A., Pozdnyakov S.A., Ivanov A.S. Modern means of initiation of JSC «NMZ «ISKRA». *Blasting business.* 2019; 123-80: 136-143. (In Russ.).
14. Менжулин М.Г., Бровин В.Е. Энергетическая эффективность разрушения горных пород при взрыве взрывчатых веществ с различными детонационными характеристиками. *Записки Горного института*. 2007; 171: 121-125.
Menzhulin M.G., Brovin V.E. Energy efficiency of rock destruction during the explosion of explosives with different detonation characteristics. *Notes of the Mining Institute.* 2007; 171: 121-125. (In Russ.).
15. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Кононенко М.Н. Обоснование параметров буровзрывной проходки горизонтальных горных выработок с подчищающими зарядами взрывчатых веществ в опережающих скважинах вруба. *Горные науки и технологии*. 2020; 5 (4): 336-348. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-336-348.
Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Kononenko M.N. Justification of parameters for drill-and-blast excavation of horizontal mine workings using clean-up explosive charges in advance cut-hole boreholes. *Mining Science and Technology.* 2020; 5 (4): 336-348. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-336-348.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вячеслав Федорович Гутник –
руководитель проекта обособленного подразделения в г. Челябинске АО «Моспроект-3», «Строительство линии скоростного транспорта в городе Челябинске. Линия «Север-Юг», г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: Gutnik.vf@yandex.ru

Анушенков Александр Николаевич –
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой подземная разработки месторождений Института цветных металлов Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация

Критерии авторства:
Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 14.08.2026
Поступила после рецензирования: 11.09.2026
Принята к публикации: 09.10.2026

ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav F. Gutnik –
Project Manager for a separate subdivision in Chelyabinsk, JSC MOSPROEKT-3, "Construction of a high-speed transport line in Chelyabinsk. North-South Line.", Moscow, Russian Federation;
e-mail: Gutnik.vf@yandex.ru

Aleksandr N. Anushenkov –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Underground Mining of Deposits, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Contribution:
The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 14.08.2026
Revised: 11.09.2026
Accepted: 09.10.2026

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.658
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-65-73

REVIEW ARTICLE
UDC 622.658

Современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства

В. А. Атрушкевич✉, С. М. Попов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» РАН, г. Москва, Российская Федерация
✉ *iugi@mail.ru*

Резюме. Рассматриваются современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта (ИИ) в обеспечении безопасности горного производства. Актуальность исследования обусловлена высоким уровнем производственных рисков в горнодобывающей отрасли и необходимостью повышения эффективности систем промышленной безопасности в условиях цифровой трансформации. Проведен анализ теоретических основ развития ИИ, особенностей обеспечения безопасности горного производства, а также роли интеллектуальных технологий в управлении производственными рисками. Рассмотрены современные практики внедрения ИИ на российских и зарубежных горнодобывающих предприятиях, включая предиктивную аналитику, компьютерное зрение, цифровые двойники и системы поддержки принятия решений. Выявлены основные проблемы и ограничения применения ИИ, такие как недостаточная цифровая инфраструктура, дефицит кадров, высокая стоимость внедрения и вопросы нормативно-правового регулирования. Обоснованы перспективные направления развития ИИ в горной промышленности, включая создание автономных систем, развитие цифровых экосистем и совершенствование организационного механизма внедрения. Разработаны рекомендации по повышению эффективности применения ИИ в системе промышленной безопасности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, горная промышленность, промышленная безопасность, цифровизация, предиктивная аналитика, компьютерное зрение, цифровой двойник, управление рисками, автоматизация производства, интеллектуальные системы

Для цитирования: Атрушкевич В.А., Попов С.М. Современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства**.** *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 65-73. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-65-73.

The current state and prospects of organizing the use of artificial intelligencein mining safety issues

V. A. Atrushkevich✉, S. M. Popov
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ *iugi@mail.ru*

Abstract. The article examines the current state and prospects for organizing the use of artificial intelligence (AI) in ensuring the safety of mining operations. The relevance of the study is due to the high level of production risks in the mining industry and the need to improve the efficiency of industrial safety systems in the context of digital transformation. An analysis has been carried out of the theoretical foundations of AI development, the specifics of ensuring the safety of mining operations, and the role of intelligent technologies in managing production risks. Modern practices of AI implementation at Russian and foreign mining enterprises are considered, including predictive analytics, computer vision, digital twins, and decision support systems. The main problems and limitations of AI application have been identified, such as insufficient digital infrastructure, a shortage of personnel, the high cost of implementation, and issues related to regulatory and legal regulation. Promising directions for the development of AI in the mining industry have been substantiated, including the creation of autonomous systems, the development of digital ecosystems, and the improvement of the organizational mechanism for implementation. Recommendations have been developed to enhance the effectiveness of AI application in the industrial safety system.

© Атрушкевич В. А., Попов С. М., 2026

Keywords: artificial intelligence; mining industry; industrial safety; digitalization; predictive analytics; computer vision; digital twin; risk management; production automation; intelligent systems

For citation: Atrushkevich V.A., Popov S.M. The current state and prospects of organizing the use of artificial intelligence in mining safety issues. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (5): 65-73. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-65-73.

Введение

Современное развитие горнодобывающей промышленности характеризуется усложнением технологических процессов, ростом глубины и масштабов добычи полезных ископаемых, а также повышением требований к промышленной и экологической безопасности [1]. Горное производство относится к числу наиболее опасных отраслей экономики, что обусловлено воздействием неблагоприятных геологических условий, использованием сложной техники, наличием взрывоопасных и токсичных газов, а также высоким уровнем производственного травматизма [2, 3]. В этих условиях обеспечение безопасности становится приоритетной задачей, требующей применения современных цифровых технологий [4, 5].

Одним из наиболее перспективных направлений повышения уровня промышленной безопасности является внедрение искусственного интеллекта (ИИ) [6, 7]. Развитие ИИ-технологий позволяет существенно расширить возможности анализа производственных данных, прогнозирования аварийных ситуаций, автоматизации контроля технологических процессов и снижения влияния человеческого фактора [8–10]. Искусственный интеллект становится важным инструментом перехода от реактивной модели обеспечения безопасности к предиктивной и проактивной системе управления рисками [11–13].

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности систем промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях в условиях цифровой трансформации экономики [4, 14, 15]. Несмотря на активное внедрение отдельных элементов ИИ, уровень их интеграции в систему управления безопасностью остается недостаточным, что требует комплексного анализа современного состояния и перспектив развития данных технологий [6, 7, 16].

Объектом исследования выступает система обеспечения безопасности горного производства. Предметом исследования является организация применения искусственного интеллекта в данной системе.

Цель работы: изучение современного состояния внедрения ИИ в горной промышленности и определение перспектив его дальнейшего развития в области промышленной безопасности [2, 4, 5].

Задачи исследований: рассмотреть сущность и основные направления развития искусственного интеллекта; проанализировать особенности обеспечения безопасности горного производства; изучить современные практики применения ИИ на предприятиях; выявить проблемы и ограничения внедрения интеллектуальных технологий; определить перспективы их развития и разработать рекомендации по повышению эффективности использования ИИ [6, 9].

Методологическую основу исследования составляют системный подход, анализ и синтез информации, сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта, а также обобщение научных публикаций и практических данных [5, 8, 17].

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для совершенствования систем промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях и повышения эффективности применения технологий искусственного интеллекта [3, 4, 12].

Таким образом, исследование современного состояния и перспектив организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства является актуальным и имеет важное теоретическое и практическое значение в условиях цифровой трансформации промышленности [7, 13, 14].

Результаты исследований

Искусственный интеллект в системе управления промышленной безопасностью горных предприятий

Искусственный интеллект занимает важное место в современной системе управления промышленной безопасностью горных предприятий, поскольку позволяет существенно повысить уровень контроля, прогнозирования и предупреждения производственных рисков [4, 6, 7]. Горнодобывающая отрасль относится к числу наиболее опасных сфер промышленности, где высока вероятность аварий, обрушений, выбросов газа, отказов оборудования и производственного травматизма [2]. В этих условиях традиционные методы управления безопасностью уже не всегда обеспечивают необходимую эффективность, что делает внедрение интеллектуальных технологий особенно актуальным [5, 14].

Основная роль ИИ заключается в переходе от реактивной модели безопасности, при которой меры принимаются после возникновения инцидента, к предиктивной системе управления рисками, ориентированной на предупреждение аварийных ситуаций [9, 10, 13]. Искусственный интеллект анализирует большие объемы производственных данных, выявляет скрытые закономерности и позволяет прогнозировать потенциальные угрозы еще до их фактического проявления [6, 9].

Одним из ключевых направлений применения ИИ является непрерывный мониторинг опасных производственных факторов. Системы интеллектуального контроля позволяют отслеживать концентрацию метана, угольной пыли, температуру, давление, вибрации, устойчивость горных пород и состояние оборудования [5, 9]. В отличие от традиционного мониторинга ИИ способен не только фиксировать отклонения, но и оценивать вероятность развития аварийной ситуации на основе комплексного анализа параметров [10].

Важное место ИИ занимает в системе предиктивного обслуживания оборудования. На горных предприятиях поломки техники могут приводить к тяжелым последствиям, включая остановку производства и аварии [3, 9]. ИИ анализирует данные о работе оборудования, выявляет признаки износа и прогнозирует возможные отказы, что позволяет

своевременно проводить ремонт и снижать вероятность чрезвычайных ситуаций [6, 9, 16].

Значительную роль играют технологии компьютерного зрения, используемые для контроля соблюдения требований охраны труда и промышленной безопасности [7, 11]. С помощью камер видеонаблюдения и алгоритмов распознавания ИИ фиксирует нахождение работников в опасных зонах, использование средств индивидуальной защиты, соблюдение технологических регламентов и безопасное перемещение техники [11, 12]. Это позволяет оперативно предотвращать нарушения и снижать уровень производственного травматизма.

ИИ также активно используется в системах поддержки принятия решений (СППР) для диспетчеров, инженеров и руководителей [12]. Такие системы анализируют оперативную информацию, предлагают рекомендации по устранению рисков, помогают оценивать последствия возможных решений и повышают качество управленческих действий в условиях повышенной ответственности [2, 6].

Особое значение имеет использование ИИ в рамках цифровых двойников предприятий, которые позволяют моделировать аварийные сценарии, анализировать устойчивость горных выработок и тестировать управленческие решения без риска для реального производства [14, 17]. Это усиливает стратегическую составляющую промышленной безопасности и способствует более точному управлению производственными процессами [4, 14].

ИИ также становится важным элементом единой цифровой экосистемы предприятия, объединяя системы мониторинга, SCADA, ERP, датчики, аналитические платформы и управленческие решения в информационную среду [4, 10, 15]. Такая интеграция обеспечивает централизованное управление безопасностью, повышает прозрачность процессов и ускоряет реагирование на угрозы [7, 14].

Однако эффективное место ИИ в системе промышленной безопасности возможно только при наличии соответствующей цифровой инфраструктуры, подготовленных кадров, нормативного регулирования и организационного сопровождения [4, 14]. Без системного подхода даже современные технологии не смогут обеспечить устойчивый результат [7, 10].

Таким образом, искусственный интеллект становится не просто вспомогательным инструментом, а важнейшим элементом системы управления промышленной безопасностью горных предприятий [6, 7]. Его использование позволяет значительно снизить аварийность, минимизировать влияние человеческого фактора, повысить надежность производственных процессов и обеспечить переход к интеллектуальной модели безопасного горного производства [8, 9, 13].

Анализ существующих практик использования искусственного интеллекта на горнодобывающих предприятиях

В современных условиях цифровой трансформации промышленности искусственный интеллект становится важным инструментом повышения эффективности и безопасности горнодобывающих предприятий [4, 6, 7]. Горная промышленность характеризуется высоким уровнем производственных рисков, сложностью технологических процессов и необходимостью постоянного контроля состояния оборудования, производственной среды и персонала [2, 5]. В связи с этим применение ИИ направлено прежде всего на предупреждение аварий, снижение производственного травматизма и повышение надежности производственных систем [8, 9].

Одной из наиболее распространенных практик является использование предиктивной аналитики для прогнозирования отказов оборудования [9, 10]. На крупных предприятиях внедряются системы, анализирующие данные с датчиков температуры, вибрации, давления и нагрузки на оборудование [3, 9]. Искусственный интеллект выявляет скрытые закономерности, предшествующие поломкам, и позволяет планировать техническое обслуживание до возникновения аварийной ситуации [6, 9, 16]. Такой подход значительно снижает количество внеплановых простоев и повышает безопасность эксплуатации техники [9, 16].

Широкое распространение получили системы компьютерного зрения, применяемые для контроля опасных зон и соблюдения требований охраны труда [12, 18]. С помощью видеокамер и алгоритмов ИИ осуществляется автоматическое распознавание присутствия работников в запрещенных зонах, использования средств индивидуальной защиты, соблюдения технологических регламентов и контроля передвижения техники [15, 16]. Это позволяет оперативно выявлять нарушения и предотвращать несчастные случаи [2].

Особое значение имеют системы интеллектуального мониторинга газовой среды и аэрологической безопасности, особенно на угольных шахтах [11]. ИИ используется для анализа концентрации метана, угольной пыли, температуры, влажности и вентиляционных параметров [5, 8]. На основе непрерывного мониторинга система способна прогнозировать опасные состояния шахтной атмосферы, предупреждать о риске взрывов, пожаров и профессиональных заболеваний работников [7, 9].

Практика показывает высокую эффективность применения ИИ в области автоматизированных медицинских осмотров персонала [16]. На ряде предприятий используются системы предсменного контроля состояния работников, которые автоматически измеряют давление, частоту пульса, выявляют признаки усталости, стресса или алкогольного опьянения [3, 16]. Это снижает риск допуска сотрудников к работе в состоянии, представляющем угрозу для безопасности производства [3].

Важным направлением является использование цифровых двойников и интеллектуального моделирования производственных процессов [14, 17]. Виртуальные модели шахт, карьеров и оборудования позволяют прогнозировать развитие аварийных ситуаций, анализировать устойчивость горных пород, тестировать сценарии аварий без риска для реального производства [14, 17, 19]. Это значительно повышает качество управленческих решений [4, 14].

На многих предприятиях внедряются системы поддержки принятия решений (СППР), которые выполняют функции цифровых помощников для операторов, диспетчеров и инженеров [12–16]. Такие системы анализируют большие массивы данных, формируют рекомендации по управлению технологическими процессами и предупреждают о возможных нарушениях [6, 18]. Это позволяет снизить влияние человеческого фактора и повысить точность управленческих решений [7, 10].

Примером успешного внедрения ИИ является компания «Норникель», где используются технологии компьютерного зрения, предиктивной аналитики и интеллектуального контроля технического состояния оборудования [4, 6]. Существенный эффект достигается также на предприятиях, использующих концепцию «Цифровой карьер», где ИИ прогнозирует отказы карьерной техники и оптимизирует ремонтные процессы [4, 16].

Несмотря на положительные результаты, практика внедрения ИИ сталкивается с рядом ограничений. Среди них – высокая стоимость внедрения, недостаточная цифровая инфраструктура, дефицит квалифицированных специалистов, сложности интеграции новых систем в существующие производственные процессы и необходимость совершенствования нормативного регулирования [19].

Таким образом, существующие практики использования искусственного интеллекта на горнодобывающих предприятиях подтверждают его высокую эффективность в обеспечении промышленной безопасности [7, 8]. ИИ позволяет не только повышать производственную надежность и снижать аварийность, но и формирует основу для перехода к интеллектуальному и предиктивному управлению безопасностью в горной промышленности [9, 13].

Российский и зарубежный опыт внедрения искусственного интеллекта в горной промышленности

Внедрение искусственного интеллекта в горной промышленности является одним из ключевых направлений цифровой трансформации отрасли как в России, так и за рубежом [4, 6, 13]. Современные горнодобывающие предприятия стремятся повысить уровень промышленной безопасности, снизить аварийность, оптимизировать производственные процессы и сократить влияние человеческого фактора [2, 13]. Практика показывает, что ИИ становится эффективным инструментом решения этих задач [8, 9].

Российский опыт внедрения искусственного интеллекта

В России применение ИИ в горнодобывающей отрасли активно развивается на крупных предприятиях металлургического, угольного и сырьевого комплексов [4, 5]. Основное внимание уделяется вопросам промышленной безопасности, контролю состояния оборудования и автоматизации технологических процессов [2, 6] (рисунок).

Представленный рисунок отражает практические направления применения искусственного интеллекта на различных горнодобывающих предприятиях и демонстрирует его роль в повышении уровня промышленной безопасности, эффективности производства и снижении производственных рисков. Систематизированы основные предприятия и технологические решения, основанные на использовании ИИ, а также показаны конкретные результаты их внедрения.

Первая строка рисунка описывает опыт компании «Норникель», где применяются технологии предиктивной аналитики и компьютерного зрения. Данные решения позволяют осуществлять контроль опасных зон, прогнозировать отказы оборудования, отслеживать состояние агрегатов и использовать цифровых помощников. В результате достигается снижение аварийности и простоев, а также выявление неисправностей на ранних стадиях, что обеспечивает значительный экономический эффект.



Рис. **Примеры внедрения искусственного интеллекта на предприятиях горнодобывающих отраслей России /**
Fig. **Examples of AI implementation in mining enterprises in Russia**

Вторая строка отражает опыт Solidcore Resources (Бакырчикское горнодобывающее предприятие), где внедрены системы искусственного интеллекта в области медико-биометрического контроля персонала. Использование автоматизированных предсменных медицинских осмотров позволяет выявлять признаки усталости и отклонений состояния здоровья работников, а также обеспечивать цифровой допуск к работе. Это способствует снижению риска допуска сотрудников в опасном состоянии и уменьшению уровня травматизма.

Третья строка характеризует применение ИИ на угольных шахтах, где основное внимание уделяется мониторингу газовой среды и пылевой нагрузки. Системы искусственного интеллекта контролируют концентрацию метана, угольной пыли, анализируют аэрологическую безопасность и прогнозируют опасные состояния шахтной атмосферы. Это позволяет своевременно предотвращать аварии, такие как взрывы и пожары, а также снижать профессиональные риски для работников.

Четвертая строка описывает систему «Цифровой карьер», основанную на прогнозной аналитике оборудования. ИИ используется для анализа вибраций и температурных параметров техники, прогнозирования возможных поломок и планирования технического обслуживания. В результате снижается количество внеплановых простоев, повышается надежность оборудования и общий уровень промышленной безопасности.

Пятая строка отражает использование систем поддержки принятия решений (СППР) на горнодобывающих предприятиях. Такие системы предоставляют операторам техники, машинистам и водителям интеллектуальные рекомендации, помогают контролировать технологические процессы и снижать вероятность ошибок персонала. Это способствует уменьшению влияния человеческого фактора и повышению безопасности производства.

В целом таблица наглядно демонстрирует, что внедрение искусственного интеллекта в горнодобывающей отрасли охватывает ключевые направления: контроль безопасности, мониторинг производственной среды, прогнозирование отказов оборудования и поддержку принятия решений. Совокупное применение этих технологий обеспечивает повышение эффективности производства, снижение аварийности и формирование более безопасной и устойчивой системы горного производства.

Зарубежный опыт внедрения искусственного интеллекта

Международная практика показывает более высокий уровень интеграции ИИ в систему управления горным производством [7, 13]. Зарубежные компании активно переходят к концепции «умного рудника» (Smart Mining), где большинство процессов управляется с использованием интеллектуальных систем [13, 19].

Одним из лидеров является компания Rio Tinto (Австралия), где используются автономные карьерные самосвалы, роботизированные буровые установки и интеллектуальные системы диспетчеризации [20]. ИИ обеспечивает управление техникой без участия человека, что значительно снижает риск производственного травматизма и повышает производительность [13, 20].

Компания BHP (Австралия) применяет цифровые двойники месторождений, системы прогнозирования отказов оборудования и интеллектуальные платформы управления производственными процессами [17]. Это позволяет моделировать аварийные сценарии, оптимизировать логистику и минимизировать риски [14, 17].

Компания Anglo American (Великобритания) внедряет системы машинного обучения для анализа геологических данных, прогнозирования устойчивости пород и повышения точности буровзрывных работ [19]. Также активно используются интеллектуальные системы контроля состояния оборудования и персонала [7, 19].

В Канаде и США широко применяются беспилотные летательные аппараты (дроны) с элементами ИИ для мониторинга состояния карьеров, обследования труднодоступных участков и оценки геомеханических рисков [7, 18].

Сравнительный анализ российского и зарубежного опыта

Сравнение показывает, что в России основное внимание сосредоточено на локальных решениях в области безопасности и контроля оборудования, тогда как зарубежные компании чаще реализуют комплексную цифровую трансформацию всего предприятия [4, 7, 15].

Российские предприятия в большей степени используют ИИ для мониторинга опасных факторов [5]; контроля промышленной безопасности; прогнозирования отказов оборудования [9, 16]; медицинского контроля персонала [12].

Зарубежные предприятия активно развивают: полностью автономные производственные системы [13, 20]; цифровые двойники предприятий [14, 17]; роботизированные комплексы [16, 20]; интеллектуальные логистические платформы [19, 20]; интеграцию ИИ в стратегическое управление производством [7, 13].

Главными ограничениями в России остаются высокая стоимость внедрения, недостаточная цифровая инфраструктура, кадровый дефицит и несовершенство нормативно-правовой базы [4, 19].

Российский и зарубежный опыт показывает высокую эффективность применения искусственного интеллекта в горной промышленности [7, 8]. ИИ позволяет значительно повысить уровень промышленной безопасности, снизить аварийность, сократить производственные затраты и обеспечить переход к интеллектуальному управлению производством [9, 13]. Перспективным направлением для российских предприятий является переход от отдельных ИИ-решений к созданию единой цифровой экосистемы безопасного и эффективного горного производства [4, 7, 14].

Проблемы и ограничения применения искусственного интеллекта в горном деле

Несмотря на значительные преимущества внедрения искусственного интеллекта в горной промышленности, его практическое применение сопровождается рядом серьезных проблем и ограничений [4, 6, 7]. Горнодобывающая отрасль относится к числу наиболее сложных и опасных сфер производства, где любые ошибки могут привести к авариям, значительным экономическим потерям и угрозе жизни работников [2]. Поэтому внедрение ИИ требует не только технической готовности, но и комплексного организационного, кадрового и нормативного обеспечения [10, 15].

Одной из главных проблем является высокая стоимость внедрения ИИ-технологий [4, 12, 15–17]. Для полноценного

функционирования интеллектуальных систем необходимы значительные инвестиции в цифровую инфраструктуру: датчики, сенсоры, системы мониторинга, серверное оборудование, каналы передачи данных, программное обеспечение и аналитические платформы [10, 14]. Особенно сложной задачей это становится для предприятий с устаревшей технической базой, где модернизация требует крупных финансовых затрат [2, 4].

Серьезным ограничением выступает недостаточный уровень цифровой инфраструктуры на многих предприятиях [4, 14]. Для эффективной работы ИИ требуется непрерывный поток качественных данных в режиме реального времени, однако на практике многие шахты и карьеры не оснащены необходимыми средствами автоматизированного контроля [5, 16]. Отсутствие современных датчиков, нестабильная связь в подземных условиях и несовместимость различных систем затрудняют полноценное внедрение ИИ [9].

Важной проблемой является дефицит квалифицированных кадров [4, 19]. Для разработки, внедрения и эксплуатации ИИ-систем необходимы специалисты, обладающие знаниями одновременно в области горного дела, промышленной безопасности, анализа данных и информационных технологий [6, 10]. На многих предприятиях отсутствуют такие специалисты, а уровень цифровой подготовки инженерно-технического персонала остается недостаточным [2, 16]. Это снижает эффективность использования даже уже внедренных решений [12].

Существенным ограничением является качество исходных данных. Искусственный интеллект напрямую зависит от достоверности, полноты и актуальности информации, на основе которой строятся прогнозы и принимаются решения [7, 10]. Ошибки в данных, некорректная работа датчиков, отсутствие исторической информации и разрозненность информационных потоков могут привести к неправильным выводам системы и снижению надежности прогнозирования [6, 12].

Особую значимость имеет проблема кибербезопасности и надежности ИИ-систем [15]. Интеллектуальные платформы работают с критически важной производственной информацией, а нарушение их работы может привести к серьезным аварийным последствиям. Возрастают риски несанкционированного доступа, кибератак, потери данных и отказов программного обеспечения [15]. В условиях горного производства даже кратковременный сбой может иметь высокую цену [2, 10].

Не менее важным ограничением является несовершенство нормативно-правовой базы. В настоящее время законодательство в сфере промышленной безопасности недостаточно адаптировано к широкому применению ИИ [7]. Отсутствуют четкие стандарты сертификации интеллектуальных систем, механизмы распределения ответственности за ошибки алгоритмов, требования к качеству данных и правовое регулирование автоматизированного принятия решений [15]. Это создает правовую неопределенность и сдерживает внедрение новых технологий [7, 10].

Проблемой также является психологическое сопротивление персонала и организационные барьеры [12, 15]. Внедрение ИИ часто воспринимается работниками как угроза сокращения рабочих мест или усиления контроля [15, 16]. Отсутствие доверия к автоматизированным решениям, низкая цифровая культура и сопротивление изменениям могут существенно замедлять процессы цифровой трансформации предприятия [4, 10].

Дополнительным ограничением выступает сложность интеграции ИИ в существующие производственные процессы [4, 14]. На практике новые интеллектуальные системы должны работать совместно с уже действующим оборудованием, программными комплексами и регламентами предприятия [3, 16]. Несовместимость технологий, необходимость остановки производственных процессов для модернизации и высокая сложность настройки систем создают дополнительные трудности [9, 15].

Таким образом, применение искусственного интеллекта в горном деле сопровождается рядом технических, экономических, организационных и правовых ограничений [4, 7].

Для успешного внедрения ИИ необходимо комплексное решение таких проблем, как развитие цифровой инфраструктуры, подготовка кадров, совершенствование нормативной базы, повышение кибербезопасности, формирование культуры цифрового управления [10, 14, 15].

Только при системном подходе искусственный интеллект сможет стать полноценным инструментом повышения безопасности и эффективности горного производства [9, 16].

Организационный механизм внедрения искусственного интеллекта

Эффективное внедрение искусственного интеллекта в горной промышленности требует не только технического оснащения предприятий, но и совершенствования организационного механизма управления этими процессами [4, 6, 7]. Практика показывает, что даже при наличии современных цифровых технологий отсутствие четкой системы управления, подготовленных кадров и нормативной базы значительно снижает результативность применения ИИ [10, 15]. Поэтому одним из ключевых направлений развития становится формирование устойчивого организационного механизма внедрения интеллектуальных систем [7, 20].

Прежде всего необходимо создание единой стратегии цифровой трансформации предприятия, в которой применение ИИ должно рассматриваться как часть общей системы промышленной безопасности и производственного управления [4, 14]. Важно определить цели внедрения, ожидаемые результаты, этапы реализации, ответственных лиц и показатели эффективности [7, 15]. Без стратегического подхода внедрение ИИ носит фрагментарный характер и не обеспечивает системного эффекта [10, 13].

Важнейшим элементом является формирование цифровой инфраструктуры предприятия [10, 20]. Для полноценной работы ИИ необходима развитая система датчиков, сенсоров, автоматизированных систем контроля, каналов передачи данных и вычислительных мощностей [5, 10]. Организационный механизм должен предусматривать интеграцию всех источников информации в единую цифровую платформу, обеспечивающую непрерывный сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени [4, 7].

Особое значение имеет создание системы управления ИИ-решениями [12, 15]. На предприятии должны быть определены подразделения и специалисты, отвечающие за эксплуатацию, контроль и развитие интеллектуальных систем [6, 12]. Это могут быть центры цифровой безо-

пасности, аналитические службы, отделы промышленной аналитики и технического сопровождения ИИ [10, 15]. Необходимо установить порядок взаимодействия между производственными службами, IT-подразделениями и руководством предприятия [4, 14].

Неотъемлемой частью организационного механизма является подготовка кадров и развитие цифровых компетенций персонала [6, 10]. Для эффективной работы ИИ недостаточно только наличия программных решений – сотрудники должны понимать принципы их функционирования, уметь интерпретировать результаты анализа и принимать управленческие решения на их основе [7, 12]. Это требует регулярного повышения квалификации, внедрения программ обучения, подготовки специалистов по анализу данных, инженеров по ИИ и цифровых аналитиков [3, 14, 17].

Важным направлением выступает совершенствование нормативно-регламентной базы предприятия. Необходимо разработать внутренние стандарты использования ИИ, регламенты работы с данными, правила принятия решений на основе интеллектуальных систем, а также порядок ответственности за действия автоматизированных алгоритмов [15]. Это особенно важно в вопросах промышленной безопасности, где ошибка может привести к серьезным последствиям.

Следующим элементом является оценка эффективности внедрения ИИ [12, 15]. Организационный механизм должен включать систему показателей, позволяющих оценивать влияние ИИ на снижение аварийности, уменьшение простоев оборудования, повышение производительности и снижение затрат [9, 12]. Постоянный контроль эффективности позволяет корректировать процессы внедрения и обеспечивать устойчивое развитие цифровой системы предприятия [7, 10].

Также необходимо уделять внимание вопросам кибербезопасности и надежности ИИ-систем [15]. Поскольку интеллектуальные системы работают с критически важной производственной информацией, требуется защита данных, резервирование систем, контроль доступа и предотвращение внешних угроз [10]. Организационная структура должна предусматривать механизмы обеспечения устойчивости цифровой инфраструктуры [7, 15].

Таким образом, совершенствование организационного механизма внедрения ИИ представляет собой комплексную задачу, включающую стратегическое управление, цифровую инфраструктуру, кадровое обеспечение, нормативное регулирование и систему контроля эффективности [7, 14]. Только при системном подходе искусственный интеллект сможет стать полноценным инструментом повышения безопасности и эффективности горного производства [6, 13].

Выводы

1. В условиях современного развития промышленности вопросы обеспечения безопасности горного производства приобретают особую значимость. Горнодобывающая отрасль традиционно относится к числу наиболее опасных сфер деятельности, поскольку связана с высоким уровнем производственных рисков, сложными технологическими процессами, воздействием вредных факторов и высокой вероятностью возникновения аварийных ситуаций. В этих условиях применение искусственного интеллекта становится важнейшим направлением повышения уровня промышленной безопасности и устойчивости производственных процессов.

2. В ходе исследования было установлено, что искусственный интеллект представляет собой эффективный инструмент предупреждения аварий, контроля состояния оборудования, мониторинга производственной среды и снижения влияния человеческого фактора. Наиболее востребованными направлениями применения ИИ в горной промышленности являются интеллектуальный мониторинг опасных факторов, предиктивная аналитика, цифровые двойники, роботизация производственных процессов, системы поддержки принятия решений и интеграция всех цифровых решений в единую систему управления безопасностью предприятия.

3. Анализ практики внедрения ИИ на российских и зарубежных горнодобывающих предприятиях показал, что использование интеллектуальных систем позволяет значительно снизить аварийность, уменьшить количество внеплановых простоев оборудования, повысить производительность труда и улучшить условия охраны труда. Особенно эффективными являются технологии компьютерного зрения, автоматизированного контроля газовой среды, прогнозирования отказов техники и цифрового сопровождения персонала.

4. Вместе с тем были выявлены и существенные проблемы внедрения ИИ, среди которых недостаточный уровень цифровой инфраструктуры, дефицит квалифицированных кадров, высокая стоимость внедрения, вопросы кибербезопасности, а также несовершенство нормативно-правового регулирования. Эти факторы существенно ограничивают возможности широкого применения интеллектуальных технологий в системе промышленной безопасности.

5. В работе обосновано, что перспективы развития ИИ в горной промышленности связаны с переходом к предиктивной модели управления безопасностью, созданием цифровых двойников предприятий, развитием автономных и роботизированных систем, совершенствованием организационного механизма внедрения ИИ и формированием единой цифровой экосистемы предприятия. Особое значение имеет развитие кадрового потенциала и создание эффективной системы управления интеллектуальными решениями.

6. На основе проведенного анализа были разработаны рекомендации по повышению эффективности применения ИИ, включающие поэтапное внедрение цифровых технологий, создание единой платформы управления безопасностью, совершенствование внутренней нормативной базы, подготовку специалистов, обеспечение кибербезопасности и постоянную оценку эффективности внедренных решений.

7. Таким образом, поставленная цель исследования достигнута, а задачи выполнены в полном объеме. Применение искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства является не только перспективным, но и необходимым условием устойчивого развития горнодобывающей отрасли. Внедрение интеллектуальных технологий позволяет сформировать новую модель промышленной безопасности, основанную на прогнозировании, предотвращении рисков и повышении общей эффективности производственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мельник В.В., Кузнецов Ю.Н., Абрамкин Н.И. Основы горного дела (Подземная геотехнология): практикум. Москва, 2019: 129.
   Melnik V.V., Kuznetsov Yu.N., Abramkin N.I. Fundamentals of Mining (Underground Geotechnology): Workshop. Moscow, 2019: 129. (In Russ.).
2. Беккер А.А. Промышленная безопасность в горной промышленности. Москва, 2021: 312.
   Becker A.A. Industrial Safety in the Mining Industry. Moscow, 2021: 312. (In Russ.).
3. Трубецкой К.Н., Хохлов С.В. Горные машины и комплексы. Москва, 2019: 380.
   Trubetskoy K.N., Khokhlov S.V. Mining Machines and Systems. Moscow, 2019: 380. (In Russ.).
4. Лукичев С.В. Цифровые горные технологии – импортозамещение и технологическая независимость. *Горная промышленность*. 2023; 5: 4-9.
   Lukichev S.V. Digital Mining Technologies – Import Substitution and Technological Independence. *Mining Industry*. 2023; 5: 4-9. (In Russ.).
5. Лукичев С.В. Цифровые горные технологии – импортозамещение и технологическая независимость. *Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле»*. Апатиты, 2023: 31-32.
   Lukichev S.V. Digital Mining Technologies – Import Substitution and Technological Independence. *Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Digital Technologies in Mining».* Apatity, 2023: 31-32. (In Russ.).
6. Гарбук С.В., Позднеев Б.М., Иванов А.В. и др. Перспективы стандартизации для развития применения технологий искусственного интеллекта в станкоинструментальной промышленности. *Станкоинструмент*. 2024; 1: 34-42.
   Garbuk S.V., Pozdneev B.M., Ivanov A.V., et al. Prospects of standardization for the development of artificial intelligence technologies in the machine tool industry. *Machine tool.* 2024; 1: 34-42. (In Russ.).
7. Azhari M., et al. The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines. *Sensors*. 2023; 23 (9): 4294. https://doi.org/10.3390/s23094294.
8. Нурбердыев Р., Пантасов О. Искусственный интеллект в автоматизации горных работ. *Инновационная наука*. 2024; 10: 20-22.
   Nurberdiev R., Pantasov O. Artificial Intelligence in the Automation of Mining Operations. *Innovative Science.* 2024; 10: 20-22. (In Russ.).
9. Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р. и др. Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова.* 2021; 4: 5-15.
   Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., et al. Predictive Analytics Tools in Minimizing Failures of Mining and Transport Equipment*. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University.* 2021; 19 (4): 5-15. (In Russ.).
10. Щербина А.В. Big data в повышении промышленной безопасности. *Одиннадцатая международная научно-практическая конференция BIG DATA and Advanced Analytics*. Минск, 2025: 27-30.
    Shcherbina A.V. Big data in improving industrial safety. *Eleventh International Scientific and Practical Conference BIG DATA and Advanced Analytics.* Minsk, 2025: 27-30. (In Russ.).
11. Imam M., Baïna K., Tabii Y., et al. The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines. *Sensors.* 2023; 23 (9): 4294. https://doi.org/10.3390/s23094294.
12. Палладина Я.А., Рябишина Л.А., Иксанов И.Х. и др. Роль системы поддержки принятия решений в обеспечении пожарной и промышленной безопасности технологических процессов нефтегазового производства. *Нефтегазовое дело*. 2023; 5: 5-19. (In Russ.).
    Palladina Ya.A., Ryabishina L.A., Iksanov I.Kh., et al. The role of the decision support system in ensuring fire and industrial safety of technological processes in oil and gas production. *Oil and gas engineering.* 2023; 5: 5-19. (In Russ.).
13. Chatterjee C., Sindhwani R., Mangla S.K., et al. Digitization of the mining industry: Pathways to sustainability through enabling technologies. *Resources Policy*. 2024; 93: 105450. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105450.
14. Кудряшова В.А., Назаров А.Ю., Разаков М.А. Цифровые двойники и информационные технологии в промышленности. *Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ»*. 2023; 4: 88-98.
    Kudryashova V.A., Nazarov A.Yu., Razakov M.A. Digital twins and information technologies in industry. *Electronic network polythematic journal «Scientific Works of KubSTU».* 2023; 4: 88-98. (In Russ.).
15. Горбатко Е.С., Гуськов А.В. Риски цифровой трансформации промышленных предприятий. *Вестник Академии знаний*. 2026; 2 (73): 144-146.
    Gorbatko E.S., Guskov A.V. Risks of digital transformation of industrial enterprises. *Bulletin of the Academy of Knowledge.* 2026; 2 (73): 144-146. (In Russ.).
16. Коваленко В.С., Зырянов И.В. Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2025; (5): 124-130.
    Kovalenko V.S., Zyryanov I.V. Automation and robotization of mining operations – the modern stage of transition to highly productive and safe open-pit mining. *Mining Industry.* 2025; (5): 124-130. (In Russ.).
17. Onifade M., Adebisi J.A., Shivute A.P., et al. Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. *Resources Policy*. 2023; 85: 103978. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103978.
18. Anglo American. FutureSmart Mining Report. 2022. URL: https://southafrica.angloamerican.com/~/media/Files/A/Anglo-American-Group- 9/PLC/investors/annual-reporting/2022/aa-annual-report-2022.pdf.
19. Rio Tinto. Autonomous Haulage System Overview. *Australia.* 2022. URL: https://minedocs.com/23/Rio_Tinto-AR-2022.pdf.
20. Qiang X., Li G., Hou J., et al. Intelligent Safety Risk Analysis and Decision-Making System for Underground Metal Mines Based on Big Data. *Sustainability*. 2023; 15 (13): 10086. https://doi.org/10.3390/su151310086.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Аркадиевич Атрушкевич –
д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела моделирования геотехнических систем, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: iugi@mail.ru

Сергей Михайлович Попов –
д-р экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования горнотехнических систем, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0003-0689-3260;
e-mail: s.popov@inbox.ru

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 09.05.2026
Поступила после рецензирования: 14.09.2026
Принята к публикации: 20.09.2026

ABOUT THE AUTHORS

Victor A. Atrushkevich –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
e-mail: iugi@mail.ru

Sergey M. Popov –
Dr. Sci. (Econ.), Leading Researcher at the Laboratory 2.3 of Mining Systems Modeling, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0003-0689-3260;
e-mail: s.popov@inbox.ru

Contribution:
The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 09.05.2026
Revised: 14.09.2026
Accepted: 20.09.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.831.1:550.8
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-74-83

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.831.1:550.8

Плотность потока радона на Анавгайском геотермальном месторождении Камчатского края

В. А. Кудряшов✉
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук»,
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
✉ *vladimirkudryasho@yandex.ru*

Резюме. Радон оказывает как негативное, так и благотворное влияние на организм человека, поэтому плотность потоков радона из глубин Земли требует детального изучения. Определение плотности потока позволяет оценить потенциальную радоноопасность в зданиях, а также помогает проводить геологоразведочные работы по естественным радиоактивным элементам: урану, торию, радию. Камчатский полуостров в целом относится к территориям с низким содержанием естественных радиоактивных элементов, однако встречаются локальные места, где поступления радона являются значительными. Это некоторые геотермальные проявления, высокотемпературные фумаролы, гидротермальные источники и вулканы. Одним из таких мест является Анавгайское геотермальное месторождение (расположено практически в центре Камчатского полуострова, в отрогах Срединного хребта, в попутных газах которого не так давно был обнаружен радон. Для оценки экологического влияния поставлена задача определения поступления потоков радона по площади геотермального месторождения. На территории месторождения находится поселок Анавгай, общественные и жилые здания которого отапливаются геотермальной водой, в связи с этим распределение радона влияет на экологическую обстановку. Определение плотности потока радона проводилось с помощью квазиинтегрального метода НТЦ «Нитон» с использованием измерительного комплекса для мониторинга радона «Камера-01». Всего на месторождении было установлено 14 измерительных камер. Измерения показали относительно незначительные плотности потока радона по площади месторождения, равные в среднем 11 ± 5,1 мБк/(м²·с) . Отмечена неравномерность распределения плотности потока радона по площади месторождения от 0 до 35 ± 7 мБк/(м²·с) (около ликвидированной скважины Э-3). Выяснено, что зоны повышенных значений плотности потока радона не связаны напрямую с соответствующими зонами тектонических нарушений, что обусловлено, по-видимому, рассеиванием потоков современными отложениями на поверхности месторождения, являющимися экранами для проникновения радона из недр, или рассеивающими поток. В большей степени повышенные значения плотности потока радона приурочены к скважинам, где в попутных газах определена объемная активность радона, измеряемая десятками тысяч беккерелей.

Ключевые слова: Камчатский край, Срединный хребет, Анавгайское геотермальное месторождение, радон, скважина, плотность потока радона

Благодарности, признательность, финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания НИГТЦ ДВО РАН № 075-00335-26-00, финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ.

Для цитирования: Кудряшов В. А. Плотность потока радона на Анавгайском геотермальном месторождении Камчатского края. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 74-83. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-74-83.

Radon flux density at the Anavgay geothermal, Kamchatka Territory

V. A. Kudryashov✉
FGBUN Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation
✉ *vladimirkudryasho@yandex.ru*

Abstract. Radon has both negative and beneficial effects on the human body, so the density of radon fluxes from the depths of the Earth requires detailed study. Determining the flux density makes it possible to assess the potential radon hazard in buildings, and also helps to carry out geological exploration for natural radioactive elements (NRE) – uranium, thorium, radium. The Kamchatka Peninsula as a whole belongs to the territories with a low content of NRE, however, there are local places where radon emissions are significant. These are some geothermal manifestations, high-temperature fumaroles, hydrothermal vents, and volcanoes. One of these

© Кудряшов В. А., 2026

places is the Anavar geothermal deposit, (located almost in the center of the Kamchatka Peninsula in the foothills of the Sredinny ridge Fig.1a), in the associated gases of which radon was discovered not so long ago. To assess the environmental impact, the task was set to determine the intake of radon fluxes by the area of a geothermal deposit (radon flux density-RFD). There is the village of Anavgay located on the territory of the deposit, the public and residential buildings of which are heated by geothermal water, and therefore, the distribution of radon affects the environmental situation. The purpose of the work was to preliminarily determine the radon flux density (RFD) in the field and to assess the relationship with geological ruptures and man-made disturbances (wells). Field research was conducted in 2025-2026. RFD was determined using the quasi-integral method of the NITON Scientific and Technological Center using the "CAMERA-01" measuring complex for radon monitoring. A total of 14 measuring chambers were installed at the field. The measurements showed relatively insignificant radon flux densities over the deposit area, averaging 11 ± 5.1 MBq/m^{2}s. A significant unevenness in the distribution of the radon flux density over the field area from zero to 35 ± 7 MBq/m^{2}s (near the liquidated well No. E-3) was noted. It was found out that the zones of increased RFD values are not directly related to the corresponding zones of tectonic disturbances, which is probably due to the dispersion of flows by modern deposits on the surface of the deposit, which are screens for radon penetration from the depths, or dissipate the flow. To a greater extent, the increased RFD values are confined to wells where the volume activity of radon measured in tens of thousands of Becquerels is determined in associated gases.

Keywords: Kamchatka Territory, Sredinny ridge, Anavgay geothermal deposit, radon, wells, radon flux density

Acknowledgments, funding, financial support: The work was performed within the framework of the state assignment of the Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences No. 075-00335-26-00, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Kudryashov V.A. Radon flux density at the Anavgay geothermal**,** Kamchatka Territory *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 74-83. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-74-83.

Введение

Влияние геологической среды на жизнедеятельность человека является важной частью исследования природных объектов. Одно из многоплановых факторов данного влияния – поступление радона к поверхности Земли. Радон входит в состав радиоактивных рядов распада изотопов урана и тория.

Наиболее распространен изотоп радона ^{222}Rn с периодом полураспада 3,8 суток. Длительность жизни данного изотопа определяет его способность мигрировать на большие расстояния. Изучение плотности потока радона (ППР) на поверхности Земли используется для решения различных задач – поиска зон разломов, месторождений радиоактивных полезных ископаемых, прогноза землетрясений, защиты сооружений [1] и др. ППР зависит от особенностей строения недр [2]: проницаемых зон (разломов), формирования магматических пород, изменения течения подземных вод и т. д.

75 процентов суммарной дозы облучения организма человека от всех источников радиации принадлежит природным источникам ионизирующего излучения. Основная роль принадлежит радону и его короткоживущим дочерним продуктам распада, за счет которых в основном и формируется коллективная доза облучения населения России [3].

Крупными европейскими эпидемиологическими исследованиями [4, 5] отмечается канцерогенный эффект радона. Согласно этим исследованиям, радон является второй по значимости причиной рака легкого (после курения). Влияние радона на организм человека требует дополнительных исследований, так авторы [6] подчеркивают, что, несмотря на значительный прогресс в понимании молекулярных механизмов, многие аспекты влияния радона на человека остаются недостаточно изученными, особенно при низких дозах, характерных для жилых помещений, и требуют совершенствования методов оценки риска.

Однако, кроме негативного воздействия [7], радон при определенных условиях может оказывать и бальнеологический эффект, достигаемый при наружном контакте тела человека с радоном, концентрация которого превышает фоновые значения. Слабое альфа-излучение инициирует в клетках и органах человека процессы регенерации [8, 9]. Это свойство радона используется в бальнеологическом лечении многих заболеваний в санаторно-курортных местностях РФ (например, Белокуриха, Кульдур, Былыра [10, 11]).

Некоторые исследователи отмечают, что поступления радона по разрывным нарушениям и неравномерность распределения радона по поверхности характерны для зон выхода минеральных флюидов. Например, фоновые значения плотности потока радона для села Касумкент, где функционирует курорт на базе слаборадоновых вод, – незначительны и составляют 20 мБк/(м^2·с) , а в зоне выхода минеральных вод были обнаружены на порядок большие значения: 240 мБк/(м^2·с) [12].

По данным Роспотребнадзора, общая радиационная обстановка на территории Камчатского края на протяжении многих лет не представляет угрозы для здоровья населения [13]. Вместе с тем имеются данные о повышенных концентрациях радона в локальных зонах активного вулканизма, в том числе геотермальных источниках [14]. В 2023 году были проведены исследования на наличие радона в попутных газах Анавгайского геотермального месторождения, в ходе работ впервые была обнаружена достаточно высокая концентрация радона в попутном газе скважины Э-2 [15]. Наличие непосредственно на Анавгайском геотермальном месторождении жилого поселка Анавгай требует дополнительного исследования ППР и оценки воздействия радона на здоровье человека.

Цель работы: предварительное определение величины плотности потока радона по площади Анавгайского геотермального месторождения; оценка влияния природных (разломных зон) и техногенных нарушений связанных с бурением скважин, а также оценка возможного влияния радона на здоровье населения.

Объект исследования

Район исследования принадлежит центральной части Срединного хребта Камчатского полуострова (рис. 1). Анавгайское месторождение термальных вод расположено в ме-

сте слияния реки Анавгай с рекой Быстрой, левым притоком реки Камчатки (56^{0}3.232’СШ; 158^{0}58.151” ВД).



Рис. 1. **Район исследования – Анавгайское месторождение. Место расположения Быстринского округа и с. Анавгай на карте Камчатского полуострова /**
Fig. 1. **The research area is the Anavay deposit. The location of Bystrinsky district and the village of Anavgay on the map of the Kamchatka Peninsula**

Село Анавгай – второй по величине поселок (около 600 человек) в Быстринском муниципальном округе Камчатского края, расположено в 334 км по прямой на север от г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1), на территории горного отвода Анавгайского месторождения термальных вод (рис. 2). Границы месторождения четко не установлены. На западе и юге, это, по-видимому, грабенобразующие разломы по правым бортам рек Анавгай и Быстрой, на севере и востоке, соответственно, районы скважин 23 и 31, в сторону которых от центра отмечается снижение температур. Площадь равнинной части месторождения – около 2 км^2.

Толщи пород представлены алнейской серией неогена (туфы, туфобрекчии), перекрытые с поверхности толщами четвертичных отложений. Максимальная глубина пробуренных скважин – до 1 463 м (скважина Э-1). Анавгайское геотермальное месторождение является составной частью Эссовско-Быстринской гидротермальной системы, характеризующейся трещинно-жильным типом коллекторов [15].

Формирование Анавгайского месторождения, как и всей Эссовско-Быстринской гидротермальной системы, является результатом смешения эндогенных флюидов с инфильтрационными водами. Продукты вулканической деятельности нижнечетвертичного возраста широко распространены по бортам долин реки Быстрой, перекрывают на склонах и водораздельной части хребтов образования неогенового фундамента, представлены преимущественно лавами базальтов, реже – андезито-базальтов. Современные отложения представлены рыхлым валунно-галечниковым речным матери-

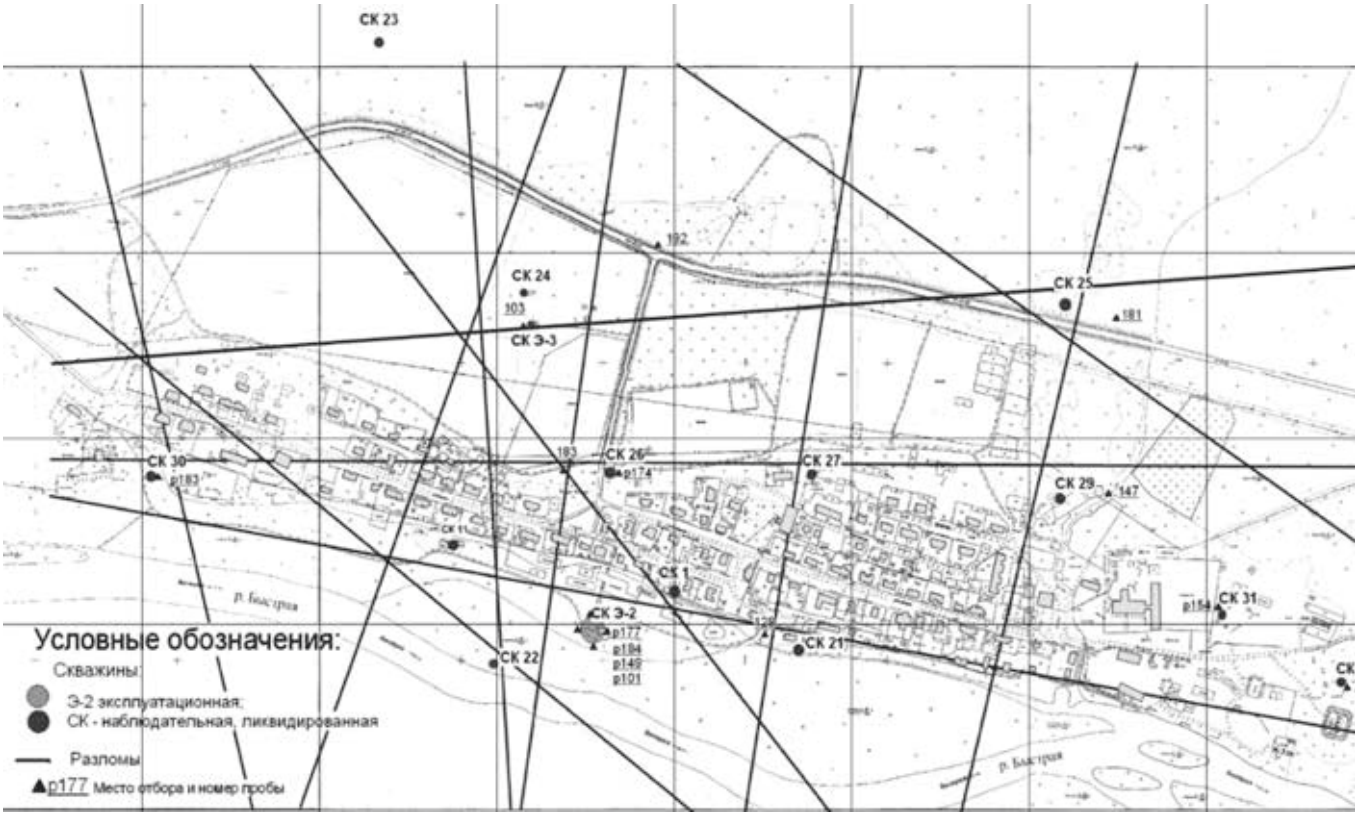


Рис. 2. **Район исследования. Карта-схема установки накопительных камер для определения плотности потока радона в с. Анавгай (Анавгайское геотермальное месторождение). Шаг сетки – 100 м. Цифра после СК – номер скважины. Подробные сведения о величинах ППР и соответствующем номере пробы приведены в таблице /**
Fig. 2. **The research area. The map is a diagram of the installation of storage chambers for determining the radon flux density in the village of Anawgay (Anawgay geothermal field). The grid pitch is 100 m. The number after the CK is the number of the well. Detailed information about the RFD values and the corresponding sample number is given in Table**

алом и илами, а также суглинками болотных отложений. Речные отложения слагают подрусловую часть рек Быстрой и Анавгай, пойменную и надпойменные террасы. Мощность рыхлых современных образований достигает 100 м (вскрыто скважиной Э-3).

Отложения сцементированы цеолит-кремнистым цементом в местах выходов геотермальных источников. Болотные отложения распространены незначительно, в верхней части встречаются торф, илы.

В структурном плане месторождение расположено на границе двух крупных тектонических структур первого порядка грабен-синклинали Срединного хребта [29] и Козыревского горстового поднятия. Структуры второго порядка (на северо-востоке – Северо-Козыревская, на западе-крупная – Анавгайская) – вулканотектонические структуры. Месторождение расположено на стыке грабенов долин рек Быстрой и Анавгай.

В геологическом строении месторождения принимают участие породы алнейской серии четвертичного возраста. Отличительными особенностями образований алнейской серии является невыдержанность отдельных пластов по мощности и простиранию при их почти горизонтальном залегании. Водовмещающие образования, представленные породами неогена перекрыты толщей четвертичных отложений мощностью до 100 м. Водопритоки вскрыты в скважинах на глубинах от 215 до 1 228 м. Выявлены дайки и субпластовые тела четвертичного возраста, представленные базальтами, андезибазальтами, андезитами.

Краткая характеристика геологического разреза на примере эксплуатационной скважины Э-2: валунно-галечные отложения Q_{IV} (0–65 м), туфы N_{al} (66–365 м), андезибазальты αQ (366–395 м), туфы в переслаивании с пластами базальтов и андезитов N_{al} (396–1 228 м).

Предварительные разведочные работы

Разведочные работы на Анавгайском геотермальном месторождении, проводились в 1969–1984 годах [29]. В период освоения было пробурено 12 поисково-разведочных скважин, большая часть которых законсервирована, часть переведена в наблюдательные. В 1989–1990 годах на территории месторождения были дополнительно пробурены три разведочно-эксплуатационные скважины Э-1, Э-2 и Э-3 глубиной, соответственно, 1 463, 1 228 и 1 421 м.

В настоящее время только одна скважина (Э-2) используется для отопления поселка Анавгай, остальные законсервированы или ликвидированы. Протоколом ТКЗ от 26 марта 1990 года утверждены запасы Анавгайского месторождения категории В – 2,72 тыс. м^3/сут, $T_{ср.взв.}$ = 71 ˚С; C_2 = 0,65 тыс. м^3/сут, $T_{ср.взв.}$ = 73 ˚С.

Анавгайские воды относятся к нейтральным, слабощелочным (pH 6.9–8.6). По химическому составу – сульфатные кальциево-натриевые (подробный химический состав вод Анавгайского месторождения приведен в работе [16]). Щелочные, азотные термы распространены в основном в районах раннечетвертичного вулканизма, которые формируются в восстановительной обстановке на глубине в зонах тектонических разломов.

На Камчатке к азотным гидротермам сульфатного и хлоридносульфатного состава относятся Паратунские, Начикинские, Тюшевские, Нижне-Чажминские, Двухюрточные, Малкинские, Эссовские и другие источники. Как правило, такие гидротермы имеют низкое газосодержание, незначительную минерализацию (до 2 г/л), хлоридно-сульфатный, кальциево-натриевый состав, повышенное содержание кремниевой кислоты (до 100 мг/л), нейтрально-щелочную реакцию среды (pH 8–9.4). Наиболее близкими к Анавгайскому месторождению по составу газов, минерализации и химическому составу являются термальные воды Нижне-Паратунского месторождения. Генетически азотно-сульфатные термы являются инфильтрационными водами, химический состав которых формируется выщелачиванием вулканогенно -осадочных пород, характерных для Камчатского полуострова. Как правило, это породы алнейской серии плиоценового возраста.

Согласно отчету [29], по составу газов Анавгайское месторождение относится к азотным термам, преобладающим спонтанным газом является азот (96,3–98,9 %), также во всех скважинах был обнаружен аргон (0,66–1,24 %) и углекислый газ (0,05–1,43 %). Остальные газы обнаружены в отдельных пробах и незначительных количествах: кислород – до 1,53 %, сероводород – 0,34 %, водород – 0,03 % и метан – 0,04–0,16 %. Относительно недавно [15] в газах Анавгайского месторождения обнаружен радон, который является ценным бальнеологическим компонентом, но в то же время в больших концентрациях может нанести вред здоровью.

На исследуемой площади ранее были выделены два комплекса магматических образований: нижнечетвертичные дайки базальтов и среднечетвертичные экструзии, а также и малые интрузии андезитов, дацитов, которые могут включать источники естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ). Накопление ЕРЭ на Камчатском полуострове, по представлениям некоторых ученых [17], происходит от зоны спрединга до зоны субдукции [14] при движении погружающейся под мантийный клин базальтовой пластины по дну Тихого океана. Взаимодействуя с подземными термальными водами, естественные радиоактивные элементы (U, Th. Ra) на глубине сотен (тысяч) метров от поверхности Земли в определенных зонах накапливаются. Появляющийся при радиоактивном распаде ЕРЭ радон ^{222}Rn (иногда в значительных концентрациях [14]) по тектоническим нарушениям, а также скважинам поднимается на поверхность, где и рассеивается.

Согласно карте радоноопасности [18, 19], данная зона Срединного хребта относится к пограничной, где концентрации радона могут как превышать допустимые, так и не достигать критических значений. Вследствие этого изучение плотности потока радона на поверхности и оценки экологической обстановки на Анавгайском геотермальном месторождении актуально.

Направление исследований

Цель работы – проведение радоновой съемки – была поставлена вследствие обнаружения в 2023 году в попутном газе скважины Э-2 Анавгайского месторождения радона ^{222}Rn.

Для оценки экологического влияния поставлена задача определения закономерностей поступления ППР по площади геотермального месторождения и оценка взаимосвязи ППР с существующими тектоническими нарушениями и техногенными нарушениями (скважины), а также предварительная оценка общей обстановки по радоноопасности в с. Анавгай.

Методика измерений

Существует множество методов определения радона (эманационные, трековые, радиографии, метод фильтров и т. п.), они подробно описаны в [20]. В настоящем исследовании использовался квазиинтегральный метод измерения плотности потока радона по стандартной методике НТЦ «Нитон»[1] , описанной в руководстве по эксплуатации прибора «Камера-01». Методика основана на поглощении радона адсорбированным углем . *Квазиинтегральный метод* основан на пассивном отборе пробы накопительной камерой (НК-32), установленной на поверхности земли (с поглощением радона, выделяемого с поверхности земли активированным углем).

Исходя из опыта проведения радоновой съемки на Эссовском гидротермальном месторождении были выбраны места установки накопительных камер (НК-32) по площади Анавгайского месторождения в привязке к пробуренным скважинам. Часть камер были установлены вдали от скважин, некоторые – на разломах. Ниже приведено описание месторасположения скважин, около которых проводились измерения (рис. 2).

Наблюдательные скважины: непосредственно перед въездом в Анавгай, слева (10 м) на пригорке, расположена наблюдательная скважина № 26 (безнапорная). На западе Анавгая находится наблюдательная безнапорная скважина № 30 (на оголовке сейсмологами установлено оборудование для записи глубины уровня воды в скважине).

После въезда в с. Анавгай, налево по дороге, через 200 м расположена скважина № 27 *(законсервированная)*, через 200 м в том же направлении, в огородах за 12-квартирным домом, находится скважина № 29 *наблюдательная (напорная)*, из оголовка которой по отводной трубке течет термальная вода с небольшим расходом около 0,1 л/с и температурой (на момент измерения) +9 °С.

Скважина Э-1 *(законсервированная)* находится далее в том же направлении, на юг от полуразрушенного здания на западной окраине с. Анавгай.

Скважина № 21 *(наблюдательная)* – на южной стороне поселка, на косогоре рядом с ручьем. Из скважины по шлангу течет вода с расходом около 0,5 л/с и температурой около 60 °С.

Эксплуатационная скважина Э-2 находится на юге, около реки Быстрой (см. фото на рис. 3). Расположение скважин приведено на карте-схеме (рис. 2).



Рис. 3. **Общий вид эксплуатационной скважины Э-2. На заднем плане – бак-накопитель /**
Fig. 3. **General view of the production well E-2. There is a storage tank in the background**

[1]Комплекс измерительный для мониторинга радона «Камера-01». Руководство по эксплуатации. М.: НТЦ «Нитон». 2003. 24 с

Методы измерения

Выбранный участок земли соответствующим образом подготавливался: очищался от дерна, камней и рыхлился в соответствии с методикой. После пересыпания подготовленного угля в НК-32 сверху устанавливалась защитная сорбционная колонка (СК-13) с целью предотвращения поступления радона из окружающего воздуха. Средняя ППР с поверхности грунта на Анавгайском месторождении измерялась в течение 1–5 часов. После проведения измерений уголь из НК-32 ссыпался в пустую СК-13, плотно закрывался, а затем транспортировался (в течение часа) к месту обработки результатов. Обработка происходила на блоках детектирования компьютерным комплексом с помощью поставляемой с прибором программы «Радон-98».

Измерения ППР проводились в различные периоды с августа 2025 года по май 2026 года. Всего было установлено 14 НК32 по площади Анавгайского месторождения. Для оценки естественного радиационного фона в местах измерений ППР проводились замеры фоновой радиации дозиметром Quantum/006-02497. Непосредственно около мест установки НК-32 измерения показали невысокий естественный фон, в пределах 12–15 мкР/ч, характерный для данной местности.

Для предварительной оценки влияния скважин измерения проводились в непосредственной близости от скважин. Около наблюдательных и ликвидированных скважин устанавливалось по одной НК-32, более детально ППР определялся около эксплуатационной скважины Э-2, возле которой было установлено четыре НК-32.

Накопительные камеры около скважин устанавливались на расстоянии 0,2–0,7 м от оголовка скважины, на грунте (за границей бетонной площадки оголовка). Для подтверждения ранее измеренной в работе [15] объемной активности радона в попутном газе скважины Э-2 были произведены дополнительный отбор газа и измерение объемной активности радона (по методике, описанной в работе [15]).

Некоторая часть НК-32 устанавливалась над предполагаемыми разрывными нарушениями и вдали от них (рис. 2). Для определения фоновых показателей плотности потока радона в условиях Срединного хребта (при отсутствии вулканической и гидротермальной деятельности) одна камера НК-32 была установлена на расстоянии 23 км севернее Анавгая, в горной тундре, в 2 м от края дороги-автозимника Анавгай – Палана (координаты приведены в табл.).

Результаты исследования и их обсуждение

Измерения плотности потока радона на Анавгайском месторождении ранее не проводились. С учетом того, что в попутных газах геотермального месторождения ранее был определен радон, автором высказано предположение, что поступление радона связано с гидротермальной деятельностью. Предположительно на площади Анавгайского месторождения потоки гидротермального флюида контролирует разрывная тектоника (рис. 2). Радон поднимается в основном по разрывным нарушениям и скважинам вместе с геотермальным флюидом и рассеивается. Для месторождения можно выделить две системы тектонических нарушений: первая включает нарушения субширотного и субмеридионального простирания, а вторая – северо-восточного и северо-западного простирания [29] (рис. 2). Кроме того, активные тектонические движения создали на площади месторождения серию диагональных нарушений.

Исследований радиоактивности пород на Анавгайском геотермальном поле в литературных источниках не обнаружено. По аналогии с Эссовским месторождением, имеющим похожие характеристики и химический состав воды [16], можно предположить, что содержание естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) U, Th, K во вмещающих породах и глинах низкое [14], с низкой γ-активностью в пределах 6 мкР/ч.

Анализ, проведенный автором работы [14], показывает, что главным γ-излучателем в данном районе является ^{40}K. В окрестностях Анавгайского геотермального месторождения отсутствуют действующие вулканы, которые могли бы повлиять на наличие радиоактивных элементов рядов урана и тория. Ранее в работе [14] отмечалось, что отклонения концентрации радона на Камчатке обнаружены именно в районах активного вулканизма (например, вулкан Толбачик, кальдера Узон, Мутновский вулкан и т. п.). Ближайшие от района исследований действующие вулканы – Ичинская сопка (расположен в 88 км по прямой на юго-запад) и Толбачик (88 км юго-восточнее Анавгайского месторождения). На расстоянии около 104 км находится крупнейший действующий вулкан Евразии – Ключевская Сопка. В непосредственной близости к месторождению стоят потухшие сравнительно небольшие четвертичные вулканы, в том числе голоценовые. Можно утверждать, что влияние вулканов отсутствует.

Сравнительно высокие значения радона отмечены [15] в попутных газах эксплуатационной скважины Э-2 Анавгайского месторождения. В рамках данного исследования были дополнительно взяты две пробы попутного газа (в объеме 2 литров) в скважине Э-2. Объемная активность радона составила 92 480 (81 080) ± 13 290 (12 490) Бк/м^3, что несколько выше ранее измеренной (в 2023 г.) – 55,3 кБк/м^3. Таким образом, дополнительно подтвердилось наличие достаточно большой концентрации радона, поднимающегося из глубин совместно с геотермальным флюидом. Поскольку основные зоны водопритоков для эксплуатационных скважин вскрыты на глубинах от 220 до 1 400 м (подробные характеристики зон водопритоков приведены в отчете [29]), предположительно эманирующий коллектор радия находится на больших глубинах, откуда и поступает радон. Для подводящего геотермального коллектора (по аналогии с Эссовским месторождением) возможно наличие трещин до 30 мм, что дает оценку глубин эманирующего коллектора радия не менее 2 км.

Рудопроявления естественных радиоактивных элементов (уран, торий, радий) имеют гидротермальный генезис[2]. Пробуренные на месторождении скважины способствуют значительному росту потока флюида к поверхности в местах этих техногенных нарушений и росту потока радона. Предположительно, на эманацию радона оказывает влияние серия мелких интрузивных тел, внедрившихся по зонам тектонического дробления.

Поскольку данные о плотности потока радона на месторождении отсутствовали, предварительно были проведены поисковые замеры около скважин. Места выбирались таким образом, чтобы охватить центральную часть и окраины Анавгайского месторождения (рис. 2). Измеренные ППР в выбранных местах приведены в таблице.

Результаты экспериментальных исследований

В ходе эксперимента непосредственно на скважине был измерен Ph, который оказался равен 8,42 (температура воды в скважине на момент измерений – 81 °C), что подтвердило слабощелочной характер геотермальной воды.

Исследования ППР (табл.) показали, что распределение плотности потока радона по площади месторождения неравномерно. Обнаруженные различия потоков радона на площади Анавгайского месторождения, по-видимому, связаны с наносами как хорошо проницаемых (песок, гравий), так и слабо проницаемых (глины, суглинки) для радона пород.

Измерения показали, что повышенные плотности потока радона не связаны с разломными зонами и тектоническими структурами, проницаемыми для газов, транспортирующих радон, поскольку рассеиваются мощными поверхностными четвертичными отложениями и частично перераспределяются слабопроницаемыми породами. Поэтому при проведении изысканий под строительство зданий и сооружений радоновая съемка необходима, независимо от того, находится ли объект над разломом, или нет.

С учетом исследований [16] автором высказано предположение, что наиболее значимый поток радона должен быть в непосредственной близости от скважин, поскольку наибольшие объемы радона выносятся с геотермальной водой и попутными газами. Данное предположение подтвердилось.

По-видимому, основной поток попутных газов, включая радон, поднимается из зон водопритоков пробуренных скважин, например, водопритоки эксплуатационной скважины Э-2 вскрыты в интервале глубин 865–885; 1115–1194; 1195–1228 м. Скорость подъема теплоносителя, содержащего радон, в скважинах на несколько порядков выше (скорость подъема флюида в эксплуатационных скважинах составляет до 2,5 м/с), чем скорость конвективных потоков в разрывных нарушениях на месторождении, однако в местах водопритоков, имеющих трещины, скорость подъема флюида может быть также значительной. Период полураспада радона всего 3,8 суток, следовательно, при значительных скоростях подъема флюида по трещинам и скважинам поверхности может достигать достаточно большая часть радона, сформированного в эманирующем коллекторе.

Повышенное содержание радона в газах, добываемых из недр, само по себе не является необычным. Например, в работе [21] указано, что активность радона в природном газе составляла от 2 до 81 Бк/м^3, однако для Анавгайского месторождения наличие радона в попутных газах впервые было определено относительно недавно: в 2023 году [15].

Поскольку площадь месторождения перекрыта глинистыми отложениями, относительно непроницаемыми для газов, а также аллювиальными породами, рассеивающими радон, выходящий из тектонических разломов, какой-либо зависимости ППР от расположения накопительных камер НК-32 непосредственно над разломными нарушениями либо в удалении от них не отмечено. Данное обстоятельство объясняется авторами работы [22]: широко распространенные толщи глинистых отложений (на примере территории Дагестана) приводят к «затуханию разломов» и могут даже служить ловушками для газов, в том числе радона. Возможно,

[2] Титаева Н. А. Ядерная геохимия: учебник. М.: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 2000. 336 с.

Таблица / Table

Результаты измерения плотности потока радона около действующей и наблюдательных скважин Анавгайского геотермального месторождения / The results of measuring the radon flux density near the operating and observation wells of the Anavgay geothermal field

Дата и время измерения	Населенный пункт	Место пробоотбора (координаты) (см. рис. 2)	Начало пробоотбора, дата, время	Окончание проботобора, дата, время	Пробо-отбор, ч:м	Продол. изм., сек	Активность радона в угле		Результаты измерения		Основание	Номер измеренной пробы
							Бк	погр.	мБк/(м²·с)	погр.		
08.08.2025 17:00	Анавгай	Ск. Э-2 эксп., 0,7 м сев.	08.08.2025 10:52	08.08.2025 14:46	3:54	4 503	0,216	0,076	5	3	Грунт	р177
08.08.2025 18:00	Анавгай	Ск. Э-2 эксп., 0,7 м юг	08.08.2025 10:54	08.08.2025 14:48	3:54	3 602	0,571	0,085	15	4	Грунт	р184
08.08.2025 17:00	Анавгай	Ск. 30 наб., 0,5 м вост.	08.08.2025 10:38	08.08.2025 14:38	4:00	4 537	0	0,076	0	4	Почва	р183
08.08.2025 18:00	Анавгай	Ск. Э-2 эксп., 0,7 м вост.	08.08.2025 10:53	08.08.2025 14:47	3:54	3 622	0,654	0,085	18	5	Почва	р149
08.08.2025 19:00	Анавгай	Ск. Э-2 эксп., 0,7 м зап.	08.08.2025 10:55	08.08.2025 14:48	3:53	3 107	0,652	0,09	18	5	Почва	р101
08.08.2025 20:00	Анавгай	Ск. 26, 0,5 м вост.	08.08.2025 11:17	08.08.2025 14:33	3:16	3 539	0,459	0,085	15	5	Почва	р174
08.08.2025 19:00	Анавгай	Ск. 31 наб., 1 м сев.	08.08.2025 11:10	08.08.2025 14:57	3:47	3 404	0,164	0,084	4	4	Грунт	р154
08.08.2025 20:00	Дорога Анавгай – Палана, 23 км на сев.	2 м от дороги СШ55°54.574' ВД158° 42.608'	08.08.2025 11:48	08.08.2025 13:48	2:00	4 185	0,001	0,077	0	4	Почва	р119
29.05.2026 21:00	Анавгай	56 метров на запад от ск. 26	29.05.2026 16:19	29.05.2026 19:49	3:30	3 322	0,325	0,084	9	4	Почва	183
29.05.2026 21:00	Анавгай	0,5 м от ск. Э-3	29.05.2026 16:27	29.05.2026 19:53	3:26	3 036	1,176	0,094	35	7	Почва	137
29.05.2026 22:00	Анавгай	50 м на вост. от ск. 29	29.05.2026 16:45	29.05.2026 19:37	2:52	1 958	0	0,102	0	7	Почва	147
29.05.2026 22:00	Анавгай	60 метров на зап. от ск. 21	29.05.2026 16:36	29.05.2026 19:43	3:07	2 296	0,192	0,096	6	6	Почва	128
29.05.2026 23:00	Анавгай	0,2 м на юг от ск. Э-1	29.05.2026 16:54	29.05.2026 19:32	2:38	3 720	0,392	0,083	15	6	Гравий	170
29.05.2026 23:00	Анавгай	100 м на восток от ск. 25 (СШ 56° 03,407' ВД 158° 58,835')	29.05.2026 17:13	29.05.2026 19:17	2:04	3 609	0,341	0,081	16	7	Почва	181
30.05.2026 00:00	Анавгай	Перекресток дор. к с. Анавгай	29.05.2026 17:03	29.05.2026 19:57	2:54	4 057	0,242	0,079	8	5	Грунт	192

аналогичная ситуация сложилась и в месте проведения настоящих исследований.

В работе [23] отмечается, что с помощью ППР можно прогнозировать значения ЭРОА радона в помещениях. Авторы [24] отмечают, что нарушение верхнего слоя, например при рытье котлована, увеличивает ППР низлежащих слоев (допустим, на уровне подошвы фундамента). Расчеты авторов показывают, что при максимальной реальной для осадочных пород длине диффузии[3], равной 1,9 м, поток радона, достигающий внешней границы поверхностного слоя, формируется в слоях, суммарная толщина которых (толщина «активного» слоя) составляет около 10 м. По их мнению, исключения возможны лишь при феноменально мощных источниках радона на больших глубинах, что характерно для геотермальных месторождений. **При** низких и средних значениях длины диффузии[3] толщина активного слоя грунта составляет от 1 до 6 м, что соизмеримо и даже может быть меньше, чем величина заглубления зданий.

По данным авторов [25], для суглинков в природных условиях коэффициент диффузии радона в 1,5–4,5 раза ниже, чем, например, для щебенистых аллювиально-делювиальных отложений. По-видимому, с этим и связана значительная неравномерность распределения ППР по поверхности на Анавгайском геотермальном месторождении.

По результатам исследований (см. рис. 4) средний уровень ППР, измеренного на Анавгайском месторождении, характеризуется как невысокий и составляет 11,7 ± 5,1 мБк/(м²·с) .

[3]Длина диффузии радона – расстояние, на котором активность радона, проходящего через слой материала вследствие диффузии, уменьшается в результате распада в е раз (е – основание натурального логарифма -2,72), м.

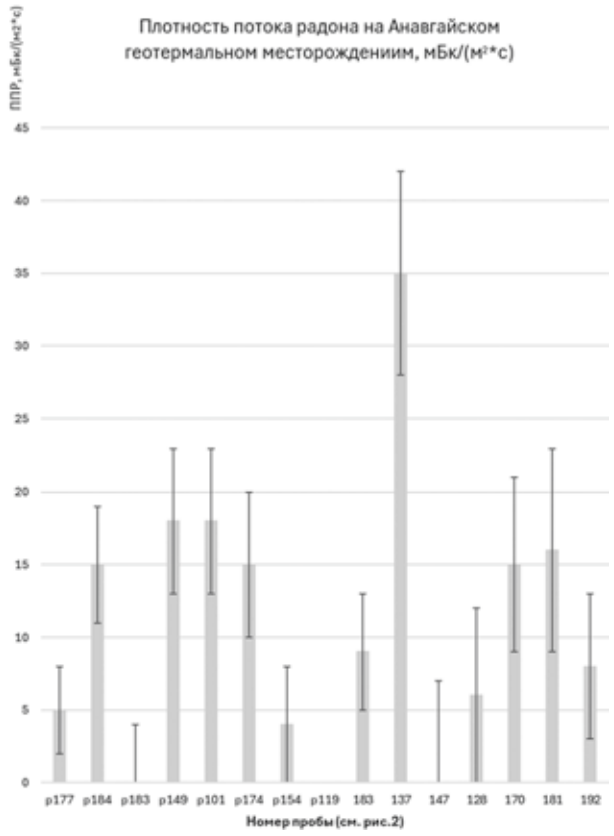


Рис. 4. **Измеренная плотность потока радона на Анавгайском геотермальном месторождении (по оси абсцисс – номер пробы (расположение точек отбора (рис. 2), пояснения в табл.) /**

Fig. 4. **Measured radon flux density at the Anavar geothermal deposit (along the abscissa axis, the sample number (location of sampling points, see Fig. 2), explanations in Table).**

Заключение

1. В России предельно допустимая плотность потока радона с поверхности грунта в пределах периметра застройки нормируется: для жилых и общественных зданий – не более 80 мБк/(м²·с); для производственных зданий и сооружений – до 250 мБк/(м²·с). Максимальное значение ППР на Анавгайском месторождении не превышало нормативного и составило 35 ± 7 мБк/(м²·с) около ликвидированной скважины Э-3. По-видимому, это связано с конструктивными особенностями скважины и фильтрацией радона в затрубном пространстве этой скважины. Следует отметить, что измеренная плотность радона в Анавгае невысокая, в РФ существуют населенные пункты со значениями ППР на два порядка больше, например в г. Волгограде [24] зафиксирована ППР, равная 3 945 мБк/(м²·с), в г. Лермонтово [26] – до 2 730 мБк/(м²·с).

2. Измеренный фоновый поток радона в условиях Срединного хребта на значительном удалении от геотермальных месторождений (в частности, от Анавгайского) показал практически полное отсутствие потока радона в этом месте (ППР = 0 ± 4 мБк/(м²·с). Дополнительно была измерена фоновая ППР в долине реки Камчатки (центральная Камчатская депрессия), около моста через реку Козыревку (координаты СШ 55°41,815’ ВД 159°25,546’), ППР = 8 ± 7 мБк/(м²·с). Данные по фоновым измерениям согласуются с утверждением, что Камчатский полуостров в целом относится к регионам с низким радиационным фоном, который не представляет угрозы для здоровья населения (данные Роспотребнадзора). Вместе с тем в научной литературе имеются данные о повышенных концентрациях радона в локальных зонах активного вулканизма, в том числе в геотермальных источниках, например, до 8 500 кБк/м³ – кратер вулкана Старый Кихпиныч [14, 27]. Это требует целенаправленного изучения радоноопасности населенных пунктов, расположенных в непосредственной близости к районам с гидротермальной и вулканической деятельностью.

3. Анализ распределения плотности потока радона по месторождению показывает, что Анавгайское месторождение характеризуется относительно равномерным распределением потока радона по поверхности. Зоны повышенных значений ППР в основном приурочены к скважинам и впрямую не зависят от зон тектонических разрывных нарушений. Повышенное значение ППР около скважин связано, вероятнее всего, с поступлением радона из глубин по трещинам в затрубном пространстве обсадных колонн скважин. Наличие радона в данном районе отмечается и на Эссовском геотермальном месторождении [28], однако в отличие от Анавгайского Эссовское месторождение характеризуется более контрастным распределением ППР по поверхности и более высокими средним (40,4 мБк/(м²·с) и максимальным (316 мБк/(м²·с) значениями ППР.

Выводы

1. Вследствие обнаружения в 2023 году в попутном газе эксплуатационной скважины Э-2 Анавгайского месторождения радона ^{222}Rn была поставлена задача определения плотности потоков радона по площади геотермального месторождения.

2. Исследование ППР проводилось в 2025–2026 годах по квазиинтегральной методике НТЦ «Нитон» с применением измерительного комплекса для мониторинга радона «Камера-01». Всего было установлено 14 накопительных камер для улавливания радона по площади месторождения. Измерения показали относительную равномерность поступления потоков радона по площади и отсутствие явной зависимости от тектонических разрывных нарушений, что связано, по-видимому, с рассеиванием потоков радона при прохождении через верхний слой валунно-галечных отложений, покрывающих Анавгайское месторождение (местами до 100 м). Среднее значение измеренной плотности потока радона на месторождении составило 11,7 ± 5,1 мБк/(м²·с). Максимальное значение ППР, в три раза выше среднего значения на месторождении, определено около ликвидированной скважины Э-3 – 35 ± 7 мБк/(м²·с). Значения ППР на Анавгайском геотермальном месторождении выше фоновых значений, измеренных на значительном удалении от месторождения, – в 23 км севернее с. Анавгай (Срединный хребет), где был измерен практически нулевой поток радона (0 ± 4 мБк/(м²·с). В сравнении с ППР Эссовского геотермального месторождения (расположенного в 22 км юго-западнее Анавгайского) среднее значение ППР Анавгайского месторождения имеет более низкие значения.

3. Несмотря на то что в целом Камчатский полуостров не относится к районам с повышенной радоноопасностью, наличие высокой активности радона в локальных местах, приуроченных к гидротермальной и вулканической деятельности, требует дальнейшего целенаправленного изучения радонопроявлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шубин И.Л., Бакаева Н.В., Калайдо А.В. Защита воздушной среды жилых и общественных зданий от радона. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022; 1 (65): 76-84. https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.65.1.007.
   Shubin I.L., Bakaeva N.V., Kalajdo A.V. Protection of the air environment of residential and public buildings from radon. *Russian Journal of Building Construction and Architecture* . 2022; 1 (65): 76-84. (In Russ.). https://doi.org/ 10.36622/VSTU.2022.65.1.007.
2. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды: теория и практика: учебное пособие. Москва, 2006: 286.
   Sapozhnikov Yu. A., Aliev R. A., Kalmykov S. N. Radioactivity of the Environment: Theory and Practice: A Textbook. Moscow, 2006: 286. (In Russ.).
3. Карпин В.А. Современные экологические аспекты естественной эманации изотопов радона: обзор литературы. *Экология человека*. 2020; 6: 34-40. https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-6-34-40.
   Karpin V.A. Modern ecological aspects of the natural emanation of radon isotopes: a review of the literature. *Human Ecology* . 2020; 6: 34-40. (In Russ.). https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-6-34-40.
4. Navratilova-Rovenska K., Boal T., Colgan T. Exposure due to radon in homes – an IAEA perspective. XXXVI. Dny radiačnej ochrany: Proceedings of the 34. Days of Radiation Protection. Poprad, 2014: 15.
5. Darby S., Hill D., Auvinen A., et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. 2005; 330 (7485): 223-227. https://doi.org/ 10.1136/bmj.38308.477650.63.
6. Marian, H. Ja. An overview of modern ideas About the effect of radon on human health / H. Ja. Marian // , 27 июня 2024 года, 2024. – P. 84-89.
7. Крисюк Э. М. Последствия воздействия на организм радона и продуктов его распада. *Аппаратура и новости радиационных измерений*. 1996/97; 3 (9): 16-24.
   Krisyuk E.M. Effects of exposure to radon and its decay products on the body. *Instruments and Radiation Measurements News (IRMN).* 1996/97; 3 (9): 16-24. (In Russ.).
8. Карпишевич Л.Г., Минько Н.П., Пономарев В.А. и др. Уникальные природные факторы санатория «Радон». *Международные обзоры: клиническая практика и здоровье.* 2017; 5-6: 124-135. URL: cyberleninka.ru/article/n/unikalnye-prirodnye-faktory-sanatoriya-radon .
   Karpishevich L.G., Minko N.P., Ponomarev V.A., et al. Unique natural factors of the sanatorium "Radon". *International Reviews on Computer Science: Series H Medical Informatics and Applications* . 2017; 5-6: 124-135. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/unikalnye-prirodnye-faktory-sanatoriya-radon.
9. Самосюк И.З., Федоров С. Н., Думин П. В. Радонотерапия: проблемы и перспективы. *Український медичний часопис*. 2000; 2: 119-123.
   Samosyuk I.Z., Fedorov S.N., Dumin P.V. Radon therapy: problems and prospects. *Ukrainian medical Chronicle.* 2000; 2: 119-123. (In Russ.).
10. Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья; отв. ред. И.К. Камилов, Б.Г. Поляк. Москва, 2001: 259.
    Kurbanov M.K. Geothermal and hydrothermal resources of the Eastern Caucasus and Ciscaucasia. Moscow, 2001: 259. (In Russ.).
11. Логинов А.А. Белокурихинское месторождение радоносодержащих кремнистых термальных вод. *Недропользование XXI век*. 2022; 6 (98): С. 32-39.
    Loginov A.A. Belokurikhinskoye deposit of radon-containing siliceous thermal waters. *Subsoil use XXI century.* 2022; 6 (98): 32-39. (In Russ.).
12. Бабаев М.Р., Газалиев И.М., Идрисов И.А. Изучение потока радона к поверхности на территории Дагестана. *Известия ДГПУ. Естественные и точные науки.* 2011; (4): 6-10.
    Babaev M.R., Gazaliev I.M., Idrisov I.A. Study of radon flow to the surface in Dagestan. Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact. 2011; (4): 6-10. (In Russ.).
13. Радиационная обстановка в Камчатском крае. Управление Роспотребнадзора по Камчатскому краю. URL: https://41.rospotrebnadzor.ru/content/radiacionnaya-obstanovka-v-kamchatskom-krae.
    Radiation situation in the Kamchatka Territory. Department of Rospotrebnadzor in the Kamchatka Territory . (In Russ.). URL: https://41.rospotrebnadzor.ru/content/radiacionnaya-obstanovka-v-kamchatskom-krae.
14. Андреев В.И. Распределение естественных радиоактивных элементов в твердых вулканитах и радиогенных газах из вулканов и гидротерм Камчатки и Курил. Петропавловск-Камчатский, 2013: 158.
    Andreev V.I. Distribution of natural radioactive elements in solid volcanites and radiogenic gases from volcanoes and hydrotherms of Kamchatka and the Kuriles. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2013. 158. (In Russ.).
15. Кудряшов В.А., Пашкевич Р.И. Оценка радонопроявлений на Анавгайском геотермальном месторождении (с. Анавгай) Быстринского района Камчатского края / Камчатка-13: вып. 2. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023; 12: 25-43.
    Kudryashov V.A., Pashkevich R.I. Assessment of radon occurrences at the Anavgay geothermal field (village of Anavgay) of the Bystrinsky district of the Kamchatka Territory / Kamchatka-13. Vol. 2. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* Moscow, 2023; 12: 25-43. (In Russ.).
16. Кудряшов В.А. Оценка проявлений радона на гидротермальных месторождениях Быстринского района Камчатского края. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* 2025; 2: 19-34. https://doi.org/10.7868/S3034640125020024.
    Kudryashov V.A. Assessment of radon manifestations in hydrothermal deposits of the Bystrinsky district of the Kamchatka Territory. *Environmental Geoscience* . 2025; 2: 19-34. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S3034640125020024.
17. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы. *Петрология*. 2006; 14 (3): 248-265.
    Avdejko G.P., Palueva A.A., Hleborodova O.A. Geodynamic conditions of volcanism and magma formation of the Kuril-Kamchatka island arc system. *Petrologiya.* 2006; 14 (3): 248-265. (In Russ.).
18. Максимовский В.А., Решетов В.В., Харламов М.Г. Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10 000 000. Под ред. Смыслова А.А.. Москва; Санкт-Петербург, 1995: 1. Maksimovsky V.A., Reshetov V.V., Kharlamov M.G. Map of radon hazard in Russia. Scale 1:10,000,000. Ed. Smyslova A.A. Moscow; Saint Peterburg, 1995: 1. (In Russ.)
    Максимовский В.А., Харламов М.Г., Мальцев В.А. и др. Районирование территории России по степени радоноопасности. *Аппаратура и новости радиационных измерений*. 1996/97; 3 (9): 66-73.
    Maksimovskij V.A., Xarlamov M.G., Malcev V.A. et al. Zoning of the territory of Russia according to the degree of radon hazard. *Instruments and Radiation Measurements News (IRMN*). 1996/97; 3 (9): 66-73. (In Russ.)

20. Мостафа Ю.А. Средства воспроизведения единиц объемной и эквивалентной равновесной объемной активности радона: автореферат дис. Екатеринбург, 2019: 20.
Mostafa, Y. A. Instruments for Reproduction of Units of Volumetric and Equilibrium Volumetric Activity of Radon: Abstract of Dissertation … Cand. Phys. Math. Sci. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Ekaterinburg, 2019: 20.

21. Наумова К.А. Эманации радона в сетевом природном газе в условиях города. *Энергия-2018: Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 6 томах.* Иваново, 2018: 41.
Naumova K.A. Radon in engineering and environmental research for construction. Energy-2018: XIII International Scientific and Technical Conference for Students, Postgraduates and Young Scientists (2018, April 3–5). Ivanovo, Russia: Ivanovo State University. 2018: 41. (In Russ.).

22. Шарафудинов Ф.Г., Крамынин П.И. Проблемы экологии в связи с разработкой нефтяных и газовых месторождений (на примере Димитровского газоконденсатного месторождения). Труды Института геологии ДНЦ АН СССР. Махачкала, 1990; 41: 220-232.
Sharafudinov F.G., Kramynin P.I. Environmental problems related to the development of oil and gas fields (case study of the Dimitrov gas condensate field). *Proceedings of the Institute of Geology, Daghestan Scientific Center, Academy of Sciences of the USSR.* Maxachkala, 1990; 41: 220-232. (In Russ.).

23. Гулабянц Л.А., Заболотский Б.Ю. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности. *Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2004; 3 (38): 16-20.
Gulabyancz L.A., Zabolotskij B.Yu. Radon flux density as a criterion for assessing radon hazard. *Instruments and Radiation Measurements News (IRMN*). 2004; 3 (38): 16-20. (In Russ.).
Глинянова И.Ю., Асанова Н.В., Пономаренко В.С. и др. Экологическая безопасность территорий жилых комплексов с позиции исследования плотности потока радона. *Инженерный вестник Дона*. 2024; 7 (115). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-bezopasnost-territoriy-zhilyh-kompleksov-s-pozitsii-issledovaniya-plotnosti-potoka-radona.

24. Glinyanova I.Yu., Asanova N.V., Ponomarenko V.S., et al. Ecological safety of residential complex territories from the perspective of radon flux density research. *Engineering journal of Don.* 2024; 7 (115). (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-bezopasnost-territoriy-zhilyh-kompleksov-s-pozitsii-issledovaniya-plotnosti-potoka-radona.

25. Маренный А.М. Радон в инженерно-экологических изысканиях для строительства. *Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2008; 2 (53): 21-27.
Marennyy A.M. Radon in engineering and environmental surveys for construction. *Instruments and Radiation Measurements News (IRMN)*. 2008; 2 (53): 21-27. (In Russ.).

26. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Сидякин П.А. и др. Формирование радоновой обстановки в зданиях образовательных учреждений г. Лермонтова. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2025; 70 (2): 40-48. https://doi.org/10.33266/1024-6177-2025-70-2-40-48.
Miklyaev P.S., Petrova T.B., Sidyakin P.A., et al. Formation of a radon environment in the buildings of educational institutions in Lermontov. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2025; 70 (2): 40-48. (In Russ.). https://doi.org/10.33266/1024-6177-2025-70-2-40-48.

27. Андреев В.И., Карданова О.Ф., Словцов И.Б. и др. Источники радия (^{226}Ra) и причины вариаций объемной активности радона (ОА ^{222}Rn) в свободных газах гидротермально-магматических систем (на примере гидротермально-магматических систем, связанных с действующими вулканами Камчатки). Улан-Удэ. URL: https://textarchive.ru/c-2386221.html.
Andreev V.I., Kardanova O.F., Slovczov I.B., et al. Sources of radium (^{226}Ra) and causes of variations in the volumetric activity of radon (OA ^{222}Rn) in free gases of hydrothermal magmatic systems (using the example of hydrothermal magmatic systems associated with active volcanoes in Kamchatka). Ulan-Ude. (In Russ.). URL: https://textarchive.ru/c-2386221.html.

28. Кудряшов В.А. Оценка наличия радона в скважинах Эссовского геотермального месторождения (с. Эссо) Быстринского района Камчатского края. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 12: 22-43. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_17_22.
Kudryashov V.A. Assessment of the presence of radon in wells of the Essovskoye geothermal deposit (Esso village) Bystrinsky district of the Kamchatka Territory. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal*. 2023; 12: 22-43. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_17_22.

29. Мальцев В.В., Забарный Г.Н., Махалкин Ю.Л. и др. Сводный отчет о результатах разведочных работ на Анавгайском геотермальном месторождении, проведенных в 1969–1984 гг. (с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на июнь1984 г.) (в двух томах): Т. 1.; Камчатское управление по использованию глубинного тепла земли. Петропавловск-Камчатский, 1987: 258.
Maltsev V. V., Zabarnyy G. N., Makhalkin Yu. L., et al. Summary report on the results of exploration work at the Anavgay geothermal deposit carried out in 1969–1984 (with an assessment of operational reserves as of June 1984) (in two volumes): Vol. 1. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 1987. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Алексеевич Кудряшов *–*
канд. техн. наук, ведущий инженер научно-исследовательского отдела ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация; e-mail: vladimirkudryasho@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 29.06.2026
Поступила после рецензирования: 25.09.2026
Принята к публикации: 13.10.2026

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Kudryashov –
Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Research Department FGBUN Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, (RGTC FEB RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation; e-mail: nigtc@nigtc.ru

Article info
Received: 29.06.2026
Revised: 25.09.2026
Accepted: 13.10.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 004.8:551.5(470.6)
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-84-89

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 004.8:551.5(470.6)

Интеграция Фурье-анализа и нейросетевых моделей для оценки гидрометеорологических угроз на территории Северо-Кавказского федерального округа

А. И. Лазовский✉
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов», г. Балашиха, Российская Федерация
✉ *lazovskiy.tolik@mail.ru*

Резюме. Представлен комплексный анализ устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенной нагрузке в условиях усиливающегося антропогенного воздействия. Актуальность исследования обусловлена высокой природной уязвимостью территории, связанной со сложным орографическим строением, климатической неоднородностью и интенсивным хозяйственным освоением региона. Исследование основано на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, методов геоинформационного моделирования и статистического анализа материалов экологического мониторинга Росгидромета, Росприроднадзора и региональных природоохранных структур за 2018–2024 года. Использование междисциплинарного подхода позволило выявить пространственно-временные закономерности трансформации природных комплексов и оценить уровень их устойчивости к техногенному воздействию. Рассмотрены природно-географические, геохимические и климатические особенности Северного Кавказа, определяющие специфику формирования экологических рисков. Установлено, что основными факторами деградации экосистем выступают горнодобывающая деятельность, интенсивное сельское хозяйство и урбанизационные процессы. В результате антропогенного воздействия фиксируются процессы эрозии и деградации почв, загрязнения поверхностных и подземных вод, сокращения биоразнообразия, а также нарушения гидрологического режима рек. Анализ геоинформационных моделей и спутниковых данных показал, что значительная часть территории региона характеризуется пониженным уровнем экологической устойчивости, при этом наиболее уязвимыми являются горные и предгорные зоны. Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке устойчивости экосистем на основе интеграции разнородных данных и методов пространственного анализа. На основе полученных результатов предложены меры по совершенствованию систем геоэкологического мониторинга, внедрению экологически безопасных технологий природопользования и рекультивации нарушенных земель. Реализация комплексного подхода к управлению природопользованием позволит снизить уровень техногенной нагрузки и обеспечить устойчивое развитие Северо-Кавказского региона.

Ключевые слова: Северо-Кавказский регион, гидрометеорологические угрозы, преобразование Фурье, нейронные сети, временные ряды, прогнозирование

Для цитирования: Лазовский А.И. Интеграция Фурье-анализа и нейросетевых моделей для оценки гидрометеорологических угроз на территории Северо-Кавказского федерального округа. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 84-89. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-84-89.

Integration of Fourier analysis and neural network models for assessing hydrometeorological hazards in the North Caucasus federal district

A. I. Lazovsky✉
Federal State Budgetary Educational Institution of Additional Professional Education "Institute of Advanced Training for Managers and Specialists", Balashikha, Russian Federation
✉ *lazovskiy.tolik@mail.ru*

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the sustainability of ecosystems in the North Caucasus region to anthropogenic stress in the context of increasing anthropogenic impact. The relevance of the study is due to the high natural vulnerability of the territory, which is associated with its complex orographic structure, climatic heterogeneity, and intensive economic development. The study is based on the integration of remote sensing data, geoinformation modeling methods, and statistical analysis of environmen-

© Лазовский А. И., 2026

tal monitoring data from Rosgidromet, Rosprirodnadzor, and regional environmental protection agencies for the period 2018–2024. The use of an interdisciplinary approach made it possible to identify the spatial and temporal patterns of the transformation of natural complexes and to assess the level of their resistance to anthropogenic impact. The natural-geographical, geochemical, and climatic features of the North Caucasus, which determine the specifics of the formation of environmental risks, are considered. It has been established that the main factors of ecosystem degradation are mining activities, intensive agriculture, and urbanization processes. As a result of anthropogenic impact, processes of soil erosion and degradation, contamination of surface and groundwater, reduction of biodiversity, and changes in river hydrological regimes are observed. The analysis of geoinformation models and satellite data has shown that a significant part of the region is characterized by a reduced level of ecological stability, with mountainous and foothill areas being the most vulnerable. The scientific novelty of the study lies in the integrated assessment of ecosystem stability based on the combination of heterogeneous data and spatial analysis methods. Based on the obtained results, measures are proposed to improve geoecological monitoring systems, implement environmentally safe technologies, and rehabilitate disturbed lands. The implementation of a comprehensive approach to environmental management will reduce technogenic load and ensure sustainable development of the North Caucasus region.

Keywords: North Caucasus region, hydrometeorological threats, Fourier transform, neural networks, time series, forecasting

For citation: Lazovsky A.I. Integration of Fourier analysis and neural network models for assessing hydrometeorological hazards in THE North Caucasus federal district. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 84-89. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-84-89.

Введение

Северо-Кавказский регион представляет собой одну из наиболее экологически уязвимых и сложных территорий Российской Федерации. Его уязвимость обусловлена синергетическим воздействием природно-географических, климатических и антропогенных факторов. Сложное орографическое строение, характеризующееся значительными перепадами высот, развитой гидрографической сетью и активными геодинамическими процессами, формирует высокую чувствительность природных комплексов к экзогенным воздействиям. Пространственная неоднородность ландшафтных зон (от равнинных степей до высокогорных экосистем) усложняет анализ и прогнозирование экологических процессов.

В последние десятилетия наблюдается интенсификация антропогенной нагрузки на экосистемы региона, связанная с экспансией горнодобывающей промышленности, расширением агропромышленного комплекса и урбанизацией [1]. Горнодобывающая деятельность приводит к деструкции почвенного покрова, формированию техногенных ландшафтов и контаминации окружающей среды тяжелыми металлами. Интенсивное сельскохозяйственное производство способствует деградации почв, эрозионным процессам и изменению гидрологического режима. Урбанизация, в свою очередь, увеличивает антропогенное давление на природные системы, включая загрязнение атмосферы и гидросферы.

Дополнительным фактором, дестабилизирующим экологическую ситуацию, являются климатические изменения, проявляющиеся в увеличении частоты экстремальных метеорологических явлений, изменении режима осадков и температурных аномалиях. Эти процессы оказывают существенное влияние на функционирование экосистем, способствуя нарушению их гомеостаза и ускорению деградационных процессов [2]. Особое значение имеют гидрологические системы, в частности бассейны рек Терек и Кубань, где климатические и антропогенные воздействия приводят к трансформации гидрологического режима, увеличению риска наводнений и ухудшению качества водных ресурсов.

Несмотря на наличие значительного числа исследований, посвященных оценке экологического состояния Северо-Кавказского региона, существующие подходы, как правило, основаны на использовании отдельных методов анализа и не обеспечивают комплексного учета многомерной структуры природных процессов. Традиционные методы статистического анализа не позволяют в полной мере учитывать пространственно-временную неоднородность и нелинейный характер изменений экосистем. В этой связи актуальным является применение интегрированных методов, объединяющих данные дистанционного зондирования Земли, геоинформационные технологии и методы математического анализа.

Использование данных дистанционного зондирования позволяет получать объективную информацию о состоянии природных комплексов на больших территориях, а геоинформационные системы обеспечивают возможность пространственного анализа и моделирования экологических процессов. В сочетании с методами статистического анализа это позволяет сформировать комплексный подход к оценке устойчивости экосистем и выявлению закономерностей их трансформации под воздействием техногенных факторов.

Цель исследования: проведение комплексной оценки устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенной нагрузке на основе интеграции данных дистанционного зондирования, геоинформационного моделирования и статистического анализа.

Задачи исследования: выявление ключевых факторов деградации экосистем, анализа пространственных закономерностей их изменения и разработки рекомендаций по снижению антропогенной нагрузки и обеспечению устойчивого природопользования [3].

Предлагаемый подход ориентирован на формирование научно обоснованной базы для разработки эффективных мер экологического управления и может быть использован при создании систем мониторинга и прогнозирования состояния природной среды в условиях усиливающегося антропогенного воздействия.

Материал и методы исследования

Настоящее исследование основано на комплексной обработке многомерных данных экологического и гидрометеорологического мониторингов, охватывающих территорию Северо-Кавказского региона, за период 2018–2024 годов с привлечением разнородных источников информации, включая данные дистанционного зондирования

Земли, геоинформационные базы, а также статистические материалы Росгидромета, Росприроднадзора и региональных природоохранных структур [4]. В качестве спутниковых источников использовались данные космических систем Sentinel-2 и Landsat-8, обеспечивающие получение мультиспектральных изображений с пространственным разрешением от 10 до 30 м, что позволило проводить детальный анализ состояния растительного покрова, почв и водных объектов.

Формирование единой базы данных осуществлялось путем интеграции пространственно-временных массивов информации с приведением к единой географической проекции и временной дискретности.

Предварительная обработка включала нормализацию показателей по формуле

$$x' = \frac{(x-\mu)}{\sigma}, \quad (1)$$

где μ – среднее значение выборки; σ – стандартное отклонение, что обеспечивало сопоставимость данных различной природы.

Для устранения выбросов применялся критерий трех стандартных отклонений, а восстановление пропущенных значений осуществлялось с использованием методов линейной и сплайн-интерполяции.

Обработка спутниковых данных включала радиометрическую и атмосферную коррекцию изображений, после чего рассчитывались спектральные индексы, характеризующие состояние экосистем [4]. В частности, для оценки состояния растительного покрова использовался нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, вычисляемый как отношение разности отражательной способности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах к их сумме. Дополнительно применялись индексы деградации растительности и влажности почв, что позволило выявить зоны экологического неблагополучия.

Пространственный анализ выполнялся с использованием геоинформационных технологий, включающих построение тематических слоев, отражающих природные и антропогенные характеристики территории.

Для оценки пространственной неоднородности применялись методы геостатистики, в частности вариограммный анализ, позволяющий определить степень пространственной корреляции экологических показателей [5]. Построение цифровых моделей рельефа и анализ морфометрических характеристик территории позволили учитывать влияние орографических факторов на формирование экологической ситуации, включая уклон, экспозицию склонов и высотную зональность.

С целью количественной оценки устойчивости экосистем был разработан интегральный показатель устойчивости, определяемый как взвешенная сумма нормализованных экологических индикаторов:

$$I = \sum_{i=1}^{n} w\,ixi, \quad (2)$$

где x_i – нормализованные значения экологических параметров; w_i – весовые коэффициенты, отражающие значимость факторов, определяемые экспертным методом и методом анализа иерархий [5].

Для выявления взаимосвязей между параметрами техногенной нагрузки и состоянием экосистем применялись методы корреляционного анализа, основанные на вычислении коэффициента корреляции Пирсона [5]:

$$r = \frac{\sum(x_i-x)(y_i-y)}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2 \sum(y_i-\bar{y})^2}}. \quad (3)$$

Регрессионный анализ использовался для количественной оценки влияния антропогенных факторов на изменение экологических показателей, что позволило определить вклад отдельных источников воздействия в деградацию экосистем.

Дополнительно применялись методы кластерного анализа для группировки территорий по уровню устойчивости экосистем, что позволило выделить зоны с различной степенью экологического риска. Классификация выполнялась с использованием алгоритмов *k*-средних и иерархической кластеризации, обеспечивших формирование типологии природных комплексов региона.

Для повышения точности анализа и выявления скрытых закономерностей в данных использовались элементы интеллектуальной обработки информации, включая методы машинного обучения, направленные на выявление нелинейных зависимостей между параметрами.

Оценка достоверности результатов проводилась с использованием методов статистической валидации, включая анализ среднеквадратичной ошибки, а также процедуры кросс-валидации, позволяющие оценить устойчивость полученных моделей к изменению входных данных [6]. Сопоставление модельных результатов с данными натурных наблюдений подтвердило адекватность предложенного подхода и его применимость для анализа экологических процессов в условиях сложной природной среды Северо-Кавказского региона.

Таким образом, предложенная методика, основанная на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, геоинформационного моделирования, статистического анализа и методов интеллектуальной обработки данных, обеспечивает комплексную оценку устойчивости экосистем и позволяет учитывать многомерный характер природных процессов в условиях техногенной нагрузки.

Результаты и обсуждение

Проведенное комплексное исследование выявило существенную неравномерность устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенным нагрузкам [7]. Эта разница обусловлена как природно-климатическими условиями, так и интенсивностью антропогенного воздействия. Благодаря объединению данных дистанционного зондирования, геоинформационного моделирования и статистического анализа удалось выделить зоны с различной степенью экологической устойчивости и разработать типологию территорий по их уязвимости.

Наиболее серьезные деградационные процессы наблюдаются в районах с высокой концентрацией горнодобывающей промышленности, а также в зонах активного сельского хозяйства и урбанизации. В этих областях зафиксированы значительные изменения растительного покрова, выражающиеся в снижении вегетационных индексов, что свидетельствует о деградации живых компонентов экосистем. Кроме того, отмечается усиление эрозии почв, приводящее к их разрушению и снижению плодородия.

Анализ гидрологических показателей указывает на устойчивую тенденцию к ухудшению качества поверхностных и подземных вод вследствие поступления техногенных загрязнителей. В бассейнах рек Терек и Кубань выявлены изменения гидрологического режима, проявляющиеся в увеличении амплитуды колебаний уровня воды и учащении экстремальных паводков.

Геоинформационный анализ подтвердил, что горные и предгорные территории являются наиболее уязвимыми из-за сочетания природной нестабильности и антропогенной нагрузки, что ускоряет деградацию экосистем. Значительная часть региона характеризуется сниженной экологической устойчивостью, что требует разработки и внедрения комплексных мер по снижению техногенной нагрузки.

Корреляционный анализ установил статистически значимую связь между показателями техногенного воздействия и состоянием экосистем, подтверждая доминирующую роль антропогенного фактора в экологических изменениях. Регрессионные модели показали, что наибольшее влияние на деградацию оказывают интенсивность промышленного освоения и уровень сельскохозяйственной нагрузки.

Важно отметить, что сочетание данных дистанционного зондирования с геоинформационным моделированием позволяет эффективно выявлять ранние признаки деградации экосистем, что критически важно для систем экологического мониторинга. Предложенный комплексный подход обеспечивает более точную и информативную оценку состояния природных систем по сравнению с использованием отдельных методов.

Таким образом, проведенное исследование позволило не только выявить ключевые закономерности трансформации экосистем Северо-Кавказского региона, но и обосновать необходимость применения интегрированных методов анализа для повышения эффективности мониторинга и управления природными ресурсами.

Ограничения и оценка неопределенности

Несмотря на полученные результаты, подтверждающие эффективность предложенного подхода, следует учитывать ряд ограничений, обусловленных как особенностями используемых методов, так и спецификой исходных данных и применяемых алгоритмов интеллектуальной обработки информации. Прежде всего применение преобразования Фурье предполагает условную стационарность анализируемых процессов, тогда как гидрометеорологические и геоэкологические данные характеризуются выраженной нестационарностью, наличием трендовых и квазипериодических компонент, а также резкими переходными состояниями. В условиях нестационарности спектральное представление сигналов может приводить к потере информации о локальных изменениях, что ограничивает точность выделения предикторов деградационных процессов.

Дополнительным фактором неопределенности является неравномерность пространственного распределения наблюдений на территории Северо-Кавказского региона, обусловленная сложным рельефом и различной степенью доступности отдельных районов [7]. Это приводит к необходимости интерполяции данных, что может вносить дополнительные погрешности, особенно в горных и предгорных зонах, где наблюдается высокая пространственная вариабельность природных процессов.

Ограничения также связаны с качеством данных дистанционного зондирования Земли, включая влияние атмосферных условий, облачности, сезонных факторов и различий в пространственном и спектральном разрешении спутниковых систем. Несмотря на применение процедур коррекции и фильтрации, полностью исключить влияние данных факторов не представляется возможным, что отражается на точности расчета спектральных индексов и последующей оценке состояния экосистем.

Существенный вклад в неопределенность результатов вносит использование нейросетевых моделей, которые, обладая высокой способностью к выявлению сложных нелинейных зависимостей, характеризуются ограниченной интерпретируемостью и чувствительностью к структуре обучающей выборки. В частности, при недостаточной репрезентативности данных возможно переобучение модели, что приводит к снижению ее обобщающей способности. Для минимизации данного эффекта применялись методы регуляризации, кросс-валидации и контроль переобучения, однако полностью исключить данный фактор невозможно.

Оценка неопределенности модели осуществлялась на основе анализа распределения ошибок прогнозирования, включая вычисление среднеквадратичной ошибки и дисперсии отклонений [8].

В общем виде дисперсия ошибки может быть представлена как

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(y_i^{\text{pred}} - x_i^{\text{true}}\right)^2, \quad (4)$$

что позволяет количественно оценить разброс прогнозных значений относительно наблюдаемых данных [9]. Дополнительно применялись процедуры кросс-валидации, обеспечивающие оценку устойчивости модели при изменении обучающих выборок.

Отдельным источником неопределенности является выбор весовых коэффициентов при формировании интегрального индекса устойчивости, поскольку их определение основано на экспертных оценках и может содержать субъективную составляющую. Для снижения влияния данного фактора проводился анализ чувствительности модели, позволяющий оценить изменение результатов при варьировании параметров.

Следует также отметить, что используемые нейросетевые архитектуры, несмотря на их эффективность, не всегда способны адекватно учитывать сложные многоуровневые взаимодействия природных процессов, особенно в условиях ограниченности данных [10]. В этой связи перспективным направлением является применение ансамблевых моделей, а также вероятностных нейросетевых подходов, включая байесовские нейронные сети, позволяющие учитывать неопределенность параметров модели и формировать доверительные интервалы прогнозов.

В качестве дальнейшего развития предложенного подхода целесообразно использование методов, учитывающих нестационарность сигналов, таких как вейвлет-анализ, а также интеграция нейросетевых моделей с адаптивными спектральными методами. Дополнительно перспективным является использование гибридных архитектур, объединяющих методы глубокого обучения и физико-математического моделирования, что позволит повысить интерпретируемость и точность результатов [11].

Таким образом, учет указанных ограничений и применение методов оценки неопределенности, включая инструменты искусственного интеллекта, являются необходимыми условиями повышения достоверности результатов и дальнейшего развития систем мониторинга и прогнозирования состояния экосистем в условиях техногенной нагрузки [12].

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна исследования заключается в разработке и научном обосновании комплексного междисциплинарного подхода к оценке устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона в условиях техногенной нагрузки, основанного на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, геоинформационного моделирования и методов многомерного статистического анализа.

Впервые для условий Северо-Кавказского региона реализована методика комплексной оценки устойчивости экосистем, учитывающая пространственно-временную неоднородность природных процессов и совокупное воздействие природных и антропогенных факторов [12]. Разработан интегральный показатель устойчивости, позволяющий количественно оценивать состояние экосистем на основе совмещения разнородных экологических индикаторов, включая характеристики растительного покрова, почв, водных ресурсов и уровня техногенной нагрузки [13].

Впервые проведена системная пространственная дифференциация территории региона по уровню экологической устойчивости с использованием геоинформационных технологий, что позволило выявить зоны повышенной экологической уязвимости, в том числе в горных и предгорных районах. Получены новые данные о закономерностях трансформации природных комплексов Северного Кавказа под воздействием горнодобывающей деятельности, сельскохозяйственного освоения и урбанизации [14].

Получены новые научные результаты, характеризующие количественные зависимости между уровнем антропогенной нагрузки и показателями деградации экосистем, включая процессы эрозии, изменения гидрологического режима и снижения биоразнообразия. Установлено, что сочетание орографических и техногенных факторов является ключевым условием формирования экологической нестабильности региона.

Разработанный подход обеспечивает повышение точности и достоверности оценки состояния экосистем за счет интеграции разнородных источников данных и использования методов пространственного анализа. Впервые показана возможность выявления ранних признаков деградации экосистем на основе комплексной обработки спутниковых и статистических данных [15].

Таким образом, научная новизна работы заключается в формировании нового методического инструментария для комплексной оценки устойчивости экосистем, обеспечивающего более глубокое понимание процессов экологической трансформации и расширяющего возможности мониторинга и управления природными ресурсами Северо-Кавказского региона.

Заключение

1. В результате проведенного исследования разработан и научно обоснован гибридный метод оценки гидрометеорологических угроз, основанный на интеграции спектрального анализа временных рядов с использованием преобразования Фурье и нейросетевых моделей глубокого обучения. Предложенный подход ориентирован на комплексный учет многомасштабной структуры гидрометеорологических процессов и позволяет объединить преимущества классических методов обработки сигналов и современных интеллектуальных алгоритмов анализа данных.

2. Установлено, что использование спектральных характеристик, включая амплитудно-фазовые и энергетические параметры сигналов, обеспечивает существенное повышение информативности входных данных для нейросетевых моделей. Это в свою очередь способствует более точному выявлению скрытых периодических закономерностей и повышает способность моделей к прогнозированию экстремальных природных явлений. Результаты численных экспериментов показали устойчивое снижение ошибки прогнозирования и повышение точности классификации гидрометеорологических угроз, что подтверждает эффективность интеграции методов Фурье-анализа и машинного обучения.

3. Проведенный анализ продемонстрировал, что предложенный метод обладает высокой устойчивостью к шумам, пропускам данных и нестабильности наблюдений, что является критически важным при работе с реальными гидрометеорологическими данными, особенно в условиях сложного рельефа и неравномерного распределения наблюдательной сети. Важным результатом является также способность модели выявлять предвестники экстремальных событий на ранних стадиях, что позволяет увеличить временной горизонт прогнозирования и повысить эффективность систем раннего предупреждения.

4. Особое значение полученные результаты имеют для территорий с повышенной природной уязвимостью, в том числе для регионов с горным рельефом и сложной климатической структурой. В таких условиях использование традиционных методов прогнозирования оказывается недостаточно эффективным, тогда как предложенный гибридный подход позволяет учитывать как временные, так и частотные особенности процессов, обеспечивая более точное и надежное моделирование.

5. Разработанная методика может быть использована в качестве основы для создания интеллектуальных систем мониторинга и прогнозирования гидрометеорологических угроз, интегрированных в существующие информационные и геоинформационные платформы. Внедрение данного подхода в практику позволит повысить оперативность принятия управленческих решений, снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций и минимизировать социально-экономический ущерб от природных катастроф.

6. Вместе с тем проведенное исследование выявило ряд направлений для дальнейшего развития предложенного подхода. В частности, перспективным является использование методов, учитывающих нестационарность сигналов, таких как вейвлет-анализ, а также интеграция дополнительных источников данных, включая спутниковые наблюдения высокого разрешения, данные беспилотных летательных аппаратов и результаты наземного мониторинга.

7. Дополнительно целесообразным представляется развитие нейросетевых моделей в направлении применения более сложных архитектур, включая трансформеры и ансамблевые методы, а также использование вероятностных подходов, позволяющих учитывать неопределенность прогнозов. Это

позволит повысить надежность моделей и обеспечить формирование доверительных интервалов для прогнозируемых значений.

8. Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую научную и практическую значимость предложенного гибридного метода, а также его перспективность для решения задач анализа и прогнозирования гидрометеорологических процессов. Развитие данного направления исследований будет способствовать совершенствованию методов мониторинга природной среды и повышению эффективности управления природными рисками в условиях усиливающегося антропогенного и климатического воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Крутова Н.А. Экологические угрозы и проблема обеспечения экономической безопасности России. *Вестник евразийской науки*. 2023; 15 (6): 27. https://doi.org/10.15862/110ecvn62.
   Krutova N. A. Environmental threats and the problem of ensuring economic security of Russia. *Bulletin of Eurasian Science.* 2023; 15 (6): 27. (In Russ.). https://doi.org/10.15862/110ecvn62.
2. Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р. Тенденции и динамика состояния и загрязнения природной среды РФ в начале XXI века. Обзор данных многолетнего мониторинга Росгидромета. *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*. 2022; 33 (1-2): 131-147. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-2-131-147.
   Chernogaeva G.M., Zhuravleva L.R. Trends and dynamics of the state and pollution of the natural environment of the Russian Federation at the beginning of the XXI century. Review of long-term monitoring data of Roshydromet. *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*. 2022; 33 (1-2): 131-147. (In Russ.). https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-2-131-147.
3. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Климат России. Москва, 2020: 300. URL: https://meteorf.gov.ru.
   Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Climate of Russia. Moscow, 2020: 300. Available at: https://meteorf.gov.ru.
4. Лурье И.К. Геоинформационные системы: учебник. Москва, 2019: 256.
   Lurye I.K. Geoinformation systems: textbook. Moscow, 2019: 256. (In Russ.).
5. Киселев В.А. Экологический мониторинг: учебное пособие. Москва, 2020: 312.
   Kiselev V.A. Environmental Monitoring: A Study Guide. Moscow, 2020: 312. (In Russ.).
6. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г. Основы горного дела. Москва, 2019: 368.
   Trubetskoy K.N., Potapov M.G. Fundamentals of Mining. Moscow, 2019: 368. (In Russ.).
7. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Москва, 2012: 412.
   Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. Soil Ecology. Moscow State University, 2012: 412. (In Russ.).
8. Черкасов А.А. Экологическое состояние Северного Кавказа: современные проблемы и пути их решения. *География и природные ресурсы*. 2020; 2: 85-92.
   Cherkasov A.A. Ecological state of the North Caucasus: current problems and solutions. *Geography and natural resources.* 2020; 2: 85-92. (In Russ.).
9. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Изменения климата на территории России. Москва, 2012: 220.
   Gruza G.V., Rankova E.Ya. Climate changes in Russia. Moscow, 2012: 220. (In Russ.).
10. Бондарев В.П. Геоэкология горных территорий Северного Кавказа. Москва, 2015: 280.
    Bondarev V.P. Geoecology of the mountainous territories of the North Caucasus. Moscow, 2015: 280. (In Russ.).
11. ESA. Sentinel-2 User Handbook. Paris: European Space Agency, 2022: 120. URL: https://sentinel.esa.int.
12. Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. New Jersey: Prentice Hall, 2015: 544.
13. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016: 800.
14. Zhang L., Liu H. Neural networks for weather prediction: A review. *Atmospheric Research*. 2021; 250: 105-115. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105365.
15. Singh R., Kumar A. Artificial intelligence in environmental monitoring. *Environmental Modelling & Software*. 2022; 148: 105248. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105248.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Анатолий Иванович Лазовский –
д-р естественных наук, ФГБОУ ДПО «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов», г. Балашиха, Российская Федерация

Вклад автора:
Постановка задачи исследования, написание текста статьи, обобщение изложенного материала, генерация идеи исследования.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 08.05.2026
Поступила после рецензирования: 06.09.2026
Принята к публикации: 22.09.2026

ABOUT THE AUTHOR

Anatoly I. Lazovsky –
Dr. of Natural Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Additional Professional Education "Institute for Advanced Training of Executives and Specialists," Balashikha, Russian Federation

Author's contribution:
Formulation of the research problem, drafting the article, synthesizing the material, and generating the research idea.

Article info
Received: 08.05.2026
Revised: 06.09.2026
Accepted: 22.09.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.2:502.171
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-90-97

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.2:502.171

Особенности прогнозирования экологических последствий при проектировании экологически сбалансированной горнотехнической системы

Н. В. Гончар[1], С. В. Корнилков[2], И. А. Четверкин[3], В. А. Пикалов[4]✉

[1]Акционерное общество «Русская медная компания», г. Екатеринбург, Российская Федерация
[2]Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
[3]Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «Мониторинг месторождений полезных ископаемых», г. Екатеринбург, Российская Федерация
[4]Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр – Геотехнология», г. Челябинск, Российская Федерация
✉ *pikalov@ustup.ru*

Резюме. Приведены структура и последовательность геолого-структурного и гидрогеологического моделирования для прогнозирования гидрогеологических и геомеханических последствий при использовании хвостов обогащения для ликвидации горных выработок. Описан подход к созданию сопряженных геолого-структурных, геомеханических, гидрогеологических и гидрохимических моделей. Практическая значимость работы продемонстрирована на примере реализации объединенной горнотехнической системы «Томинский ГОК – Коркинский разрез», где использование хвостов обогащения для закладки выработанного пространства угольного разреза позволило достичь нулевого сброса сточных вод, ликвидировать эндогенные пожары и обеспечить долгосрочную экологическую реабилитацию территории.

Ключевые слова: горнотехническая система, экологическая безопасность, жизненный цикл проекта, геолого-структурное моделирование, гидрогеологический прогноз, водный баланс, имплицитное моделирование, техногенные георесурсы, закладка выработанного пространства

Для цитирования: Гончар Н.В., Корнилков С.В., Четверкин И.А., Пикалов В.А. Особенности прогнозирования экологических последствий при проектировании экологически сбалансированной горнотехнической системы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 90-97. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-90-97.

Features of environmental impact forecasting in designing an environmentally sustainable mining system

N. V. Gonchar[1], S. V. Kornilkov[2], I. A. Chetverkin[3], V. A. Pikalov[4]✉

[1]Russian Copper Company JSC, Ekaterinburg, Russian Federation
[2]Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
[3]"Monitoring of Mineral Deposits" Research and Production Firm LLC, Ekaterinburg, Russian Federation
[4]"Scientific and Technical Center – Geotechnology" LLC, Chelyabinsk, Russian Federation
✉ *pikalov@ustup.ru*

Abstract. The paper presents the structure and sequence of geological-structural and hydrogeological modeling to forecast hydrogeological and geomechanical consequences when using tailings for the liquidation of mine workings. An approach to creating coupled geological-structural, geomechanical, hydrogeological, and hydrochemical models is described. The practical significance of the research is demonstrated by the example of the integrated mining system "Tominsky GOK – Korkinsky Coal Mine", where the use of tailings to backfill the mined-out space of the open-pit coal mine achieved zero wastewater discharge, eliminated endogenous fires, and ensured long-term environmental rehabilitation of the area.

© Гончар Н. В., Корнилков С. В., Четверкин И. А., Пикалов В. А., 2026

Keywords: mining system, environmental safety, project life cycle, geological-structural modeling, hydrogeological forecasting, water balance, implicit modeling, anthropogenic georesources, backfilling of mined-out space

For citation: Gonchar N.V., Kornilkov S.V., Chetverkin I.A., Pikalov V.A. Features of environmental impact forecasting in designing an environmentally sustainable mining system. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 90-97. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-90-97.

Введение

Современная горнодобывающая промышленность находится на этапе структурной трансформации, обусловленной устойчивым ростом спроса на минеральное сырье, в первую очередь на медь и другие цветные металлы, в том числе необходимые для развития высоких технологий. Одновременно с этим горные компании вынуждены переходить к освоению медно-порфировых и других месторождений бедных руд, которые ранее считались нерентабельными из-за низкого содержания полезного компонента и многократно увеличивать объемы добычи и переработки руды [1, 2].

Следствием этого является возрастание энерго- и материалоемкости переработки, а также значительное увеличение нагрузки на окружающую среду, проявляющееся в росте объемов отходов недропользования и формировании устойчивых потоков загрязняющих веществ в атмосфере, почвенном покрове, поверхностных и подземных водотоках прилегающих к месторождению территорий. Поэтому традиционная линейная модель недропользования: **добыча – переработка – продукт и отход,** становится экологически и социально несостоятельной, а накопленный экологический ущерб, социальная напряженность на территории реализации проекта и ужесточение экологического законодательства требуют принципиально нового подхода к организации горного производства [3, 4].

Необходим переход к эффективному и экологически сбалансированному освоению природных и техногенных георесурсов, предусматривающему отношение к отходам как к источникам новых продуктов и возможностей.

Ключевым инструментом для обоснования такого перехода являются процессы интегрированного моделирования и прогнозирования, которые позволяют еще до начала реализации проекта спрогнозировать возможные технологические, технические и экологические риски и выбрать оптимальный, наиболее безопасный вариант реализации проекта, обеспечивая формирование во времени экологически сбалансированной горнотехнической системы (ЭС ГТС).

Цель исследований: обосновать структуру и последовательность геолого-структурного и гидрогеологического моделирования для прогнозирования гидрогеологических и геомеханических последствий при использовании хвостов обогащения для ликвидации горных выработок.

Методы исследований

Одним из основных направлений использования техногенных георесурсов и утилизации отходов горно-обогатительного производства является изготовление из хвостов обогащения закладочного материала и его использование для ликвидации горных выработок. Для исключения нежелательного изменения гидрогеологической ситуации, возникновения негативных геомеханических явлений, а также оценки экологических и геотехнических рисков необходимо предварительное геолого-структурное и гидрогеологическое моделирование [5–11] (рис. 1).



Рис. 1. **Состав и функции комплексного моделирования при проектировании экологически сбалансированных горнотехнических систем /**
Fig. 1. **Composition and functions of integrated modeling in the design of ecologically balanced mining systems**

Геолого-структурная модель представляет собой геометрическое описание литолого-геологических и структурно-тектонических характеристик выделенного участка земной коры, включающее пространственное расположение различных типов горных пород и структурных элементов массива (таких как складки, разломы, зоны дробления).

Создание геолого-структурной модели необходимо для увязки между собой в трехмерном пространстве имеющихся инженерно-геологических, геомеханических и гидрогеологических исходных данных. Формирование каркасных геолого-структурных моделей проводится в три последовательных этапа с использованием специализированного программного обеспечения.

На первом этапе выполняется формирование цифровой модели земной поверхности (ЦМП) и определение границ модели. Построение каркаса топоповерхности участка проводится по сети точек при помощи инструментов создания ЦМП. Границы моделирования определяются исходя из прогноза влияния горнодобывающего предприятия.

На втором этапе осуществляется создание каркасов, отражающих структурно-тектоническое строение участка. Структурно-тектонические тела (разломы, зоны дробления, складки) отстраиваются эксплицитным (явным) методом моделирования. Этот традиционный метод выполняется вручную. По предварительно оцифрованным геологическим разрезам сначала координатно фиксируются полигоны выделенных тел по сечениям. Полученные плоские полигоны сечений стандартными программными средствами последовательно объединяются друг с другом в каркас объемного тела.

На третьем этапе ведется создание каркасов литологических разностей. Создание оболочек литологических разностей проводится с использованием имплицитного (условного) метода моделирования. Это автоматизированный метод создания поверхностей литологических разностей на основе геологических данных (скважины, канавы, разрезы). Построение поверхностей производится на основе имеющихся известных точек данных для имплицирования неизвестных точек. Для интерполяции при условном моделировании используются радиально-базисные функции (РБФ). Функции РБФ используют полигармонический и тонкий пластинчатый сплайн.

На основании созданной модели поверхности, данных о структурно-тектоническом и литологическом строении выполняются прогнозные расчеты устойчивости бортов карьеров и модель положения бортов в разные временные промежутки. При необходимости корректируются углы погашения проектируемых бортов карьера с учетом вычисленных коэффициентов запаса устойчивости.

Наряду с классическими методами предельного равновесия, в современной практике активно развиваются подходы, основанные на применении нейросетевых моделей, позволяющих прогнозировать деформации массива по ограниченному набору геомеханических параметров с точностью, сопоставимой с численным моделированием [12].

Следующим обязательным элементом комплексного моделирования выступает **гидрогеологический прогноз** – оценка уровня, направления потока и качества подземных вод на всех стадиях жизненного цикла ЭС ГТС [13–15].

Для решения задач оценки защищенности водной среды при ликвидации горных выработок предложено использовать комплексный научный подход, основанный на создании гидрогеологической модели, включающей три взаимосвязанных компонента: модель водного стока, геофильтрационную модель, гидрохимическую модель (рис. 2).



Рис. 2. **Состав и функции комплексного гидрогеологического моделирования /**
Fig. 2. **Composition and functions of integrated hydrogeological modeling**

Модель водного стока показывает зависимость поверхностного и подземного стоков территории от метеорологических и геоморфологических факторов, а также дает оценку среднего и экстремального стока для разных сезонов. Данная модель строится на основе параллельных наблюдений за стоком рек и гидрометеорологическими факторами.

Далее решается общая система балансовых уравнений, которая состоит из уравнений баланса поверхностных вод, уравнений баланса подземных вод и уравнения речного стока.

Уравнение баланса поверхностных вод (1) записывается из условия, что в теплый период года динамические запасы поверхностных вод (далее – запасы) пополняются атмосферными осадками, а расходуются на поверхностный сток, испарение и питание подземных вод:

$$\Delta З_{пов} = А - П - С - И_{пов} = \\ = F \cdot A_{мм} - R_{п} \cdot З_{пов} - R_{с} \cdot З_{пов} - R_{ипов} \cdot З_{пов} \cdot T^{2}, \text{ тыс. м}^3, \quad (1)$$

где $\Delta З_{пов}$ – суточное изменение динамических запасов поверхностных вод;

А – суточное количество атмосферных осадков, тыс. м^3;

П – суточная величина питания подземных вод, тыс. м^3;

С – суточный поверхностный сток, тыс. м^3;

$И_{пов}$ – суточное испарение с поверхности земли, тыс. м^3;

F – площадь водосбора, тыс. м^2;

$A_{мм}$ – осадки, мм;

$R_п$ – суточная доля запасов, идущая на питание подземных вод, доли ед.;

$З_{пов}$ – суточные запасы поверхностных вод;

$R_с$ – суточная доля запасов, идущая на поверхностный сток, доли ед.;

$R_{ипов}$ – суточная доля запасов поверхностных вод, идущая на испарение при единичной температуре, доли ед.;

T – максимальная дневная температура воздуха, °С.

Мобильные запасы подземных пополняются за счет питания с поверхности земли, а расходуются на разгрузку в местные водотоки и испарение с уровня грунтовых вод.

Исходя из этого может быть записано следующее уравнение баланса подземных вод

$$\Delta З_{подз} = П - Р - И_{гр} = \\ = П - R_Р \cdot З_{подз} - R_{иподз} \cdot З_{пов} \cdot Т^2, \text{ тыс. м}^3; \quad (2)$$

где $\Delta З_{подз}$ – суточное изменение мобильных запасов подземных вод, тыс. м^3;

П – суточная величина питания подземных вод, тыс. м^3;

Р – суточная разгрузка подземных вод в водотоки, тыс. м^3;

$И_{гр}$ – суточное испарение с поверхности грунтовых вод, тыс. м^3;

$R_Р$ – суточная доля запасов, идущая на разгрузку, доли. ед.;

$R_{иподз}$ – суточная доля запасов подземных вод, идущая на испарение при единичной температуре, доли. ед.

Уравнение речного стока

$$РечСток = С + Р; \quad (3)$$

где РечСток – суточный речной сток, тыс. м^3;

С – суточный поверхностный сток, тыс. м^3;

Р – суточная разгрузка подземных вод в водотоки, тыс. м^3.

Для практических расчетов представленная общая система балансовых уравнений аппроксимируется конечно-разностными аналогами с суточным шагом по времени. Вместо дифференциалов используются конечные приращения (Δ). Учитывая столь малый временной шаг (1 сутки), можно утверждать, что принятая конечно-разностная аппроксимация исходных дифференциальных уравнений не вызовет сколь-либо существенных отклонений от точного решения.

Для решения данной системы балансовых уравнений необходимо получить значения обобщенных параметров ($R_с$, $R_п$, $R_{ипов}$, $R_Р$, $R_{иподз}$) для конкретного речного бассейна. В дальнейшем, имея значения этих параметров, возможно прогнозировать подземный, поверхностный и общий речной сток, а также динамические запасы подземных вод, имея всего лишь метеоданные по атмосферным осадкам и температуре воздуха.

В условиях ограниченного объема исходных данных и высокой пространственной неоднородности карьерных территорий перспективным направлением является применение гибридных моделей машинного обучения, сочетающих ансамблевые алгоритмы и нейронные сети. Подобные подходы позволяют учитывать нелинейные взаимосвязи между гидрогеологическими, геоморфологическими и техногенными факторами риска, обеспечивая снижение ошибки прогноза и повышение устойчивости расчетов при сокращении обучающей выборки [16].

Модель водного стока позволяет оценить интенсивность питания подземных вод. Эта информация нужна для создания геофильтрационной и гидрохимической моделей.

Геофильтрационная модель строится с применением алгоритмов конечно-разностных уравнений (часто с использованием отечественного программного обеспечения) на основе оценки фильтрационной неоднородности массива и емкостных характеристик горных пород. Она позволяет спрогнозировать депрессионную воронку и приток подземных вод по мере углубления карьера в условиях гидродинамического взаимодействия.

Гидрохимическая модель строится на основе изучения минерального состава пород, кинетики химических реакций и интенсивности поступления кислорода и воды в зону реакции. Ключевым элементом является натурное гидрохимическое моделирование взаимодействия горных пород с водой, воздухом и другими факторами. Это позволяет спрогнозировать химический состав воды в горной выработке, выявить риски выщелачивания тяжелых металлов и своевременно подобрать реагенты для нейтрализации или седиментации загрязняющих веществ.

Дополнительным элементом комплексного моделирования могут служить математические модели переноса газообразных и пылевых выбросов в подземных и открытых горных выработках, позволяющие прогнозировать концентрацию загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и почвенном покрове с учетом динамики газообмена и технологических параметров добычи.

Обсуждение результатов

Описанный выше комплекс моделей был успешно апробирован при реализации проекта, в полной мере отвечающего признакам экологической сбалансированности, – объединенной горнотехнической системы «Томинский ГОК – Коркинский разрез» в Челябинской области.

Ликвидация Коркинского разреза ведется с использованием закладочного материала, приготовленного на основе хвостов обогащения медных руд Томинского месторождения [17, 18].

В состав закладочного материала входят преимущественно малорастворимые минеральные фазы, при этом многократное измельчение в мельницах обеспечивает получение частиц, размер которых сопоставим с глинистыми. Гранулометрический состав пульпы, подаваемой в выработанное пространство, в точке ее разгрузки характеризуется следующим распределением фракций по массе: песок (0,05–2 мм) – 26,3–35,1 %; пыль (0,05–0,002) – 51,1–59,4 %; фракция <0,002 мм – 13,5–17,1 %. Влажность исследуемого образца техногенной пульпы составила 30,5 %. С применением методики ЯМР-релаксации Р. Э. Дашко и соавторов проведено исследование водонасыщенного образца, в минеральном составе которого установлены следующие компоненты: кварц (SiO_2) – 40 %; альбит ($Na[AlSi_3O_8]$) – 32 %; клинохлор ($(Mg,Al)_6[Si_3, _{1\text{-}2}Al_{0,9\text{-}1,2}O_{10}](OH)_8$ – 20 %; карбонаты – 3 %; биотит ($K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,F]_2$) – 3 %; пирит ($FeS_2$) – менее 1 %; рутил ($TiO_2$) – около 1 %.

Из приведенного минерального состава следует, что типичные глинистые минералы в исследуемой пульпе отсутствуют. Формирование тонкодисперсной фракции

(<0,002 мм), вероятнее всего, обусловлено механическим разрушением алюмосиликатов, присутствующих в исходной руде, при их помоле в шаровых мельницах – главным образом, клинохлора (20 % состава) и, в меньшей степени, биотита (3 %). Проведенные эксперименты показали, что время спин-решеточной релаксации T_1 для данного образца пульпы равно $3{,}7 \cdot 10^{-2}$ с, что превышает аналогичный параметр глинистых грунтов на порядок ($T_1 = n \cdot 10^{-3}$ c). Более высокая водоотдача подобных грунтов подтверждается объемом воды, накапливающейся в разрезе по мере заполнения его закладочным материалом (рис. 3).

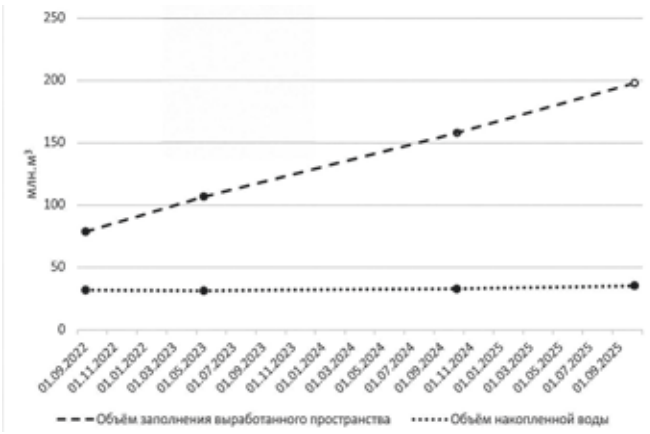


Рис. 3. **Динамика заполнения выработанного пространства закладочным материалом и формирование водного объема /**
Fig. 3. **Dynamics of backfilling mined-out space and water volume formation**

На начальном этапе проектирования были привлечены ведущие научные и проектно-изыскательские организации, которыми проведено моделирование и прогнозирование экологической и геомеханической ситуации с учетом реализации данного проекта.

Специалистами-гидрогеологами научно-производственной фирмы «Мониторинг месторождений полезных ископаемых» (г. Екатеринбург) выполнены анализ существующих гидрогеологических условий и моделирование их изменения при ликвидации Коркинского разреза, в том числе подготовлена геофильтрационная модель района разреза, прогноз гидродинамических последствий ликвидации карьерной выемки, а также прогноз химического состава воды в Коркинском разрезе при его закладке.

Ключевым результатом гидрогеологического моделирования стало доказательство того, что благодаря преобладанию испарения над атмосферными осадками, вокруг разреза как минимум в ближайшие 300 лет будет устойчиво сохраняться депрессионная воронка. Это исключает как вероятность поступления воды из разреза в подземные горизонты, так и подтопление города Коркино, расположенного на борту разреза. При этом химический состав воды в формирующемся водоеме прогнозируется более благоприятным по сравнению с вариантом естественного затопления.

С 2021 году специалистами ООО «Уралгеопроект» проводится систематический отбор проб жидкой фазы закладочного материала по вертикальным профилям, при этом число проб варьируется от 3 до 14 в зависимости от конкретного периода наблюдений. Для мониторинга были отобраны именно те гидрохимические показатели, которые на этапе первичного опробования превышали предельно допустимые концентрации, установленные СанПиН 2.1.3685-21.

Усредненные результаты проведенных исследований представлены на рисунке 4.

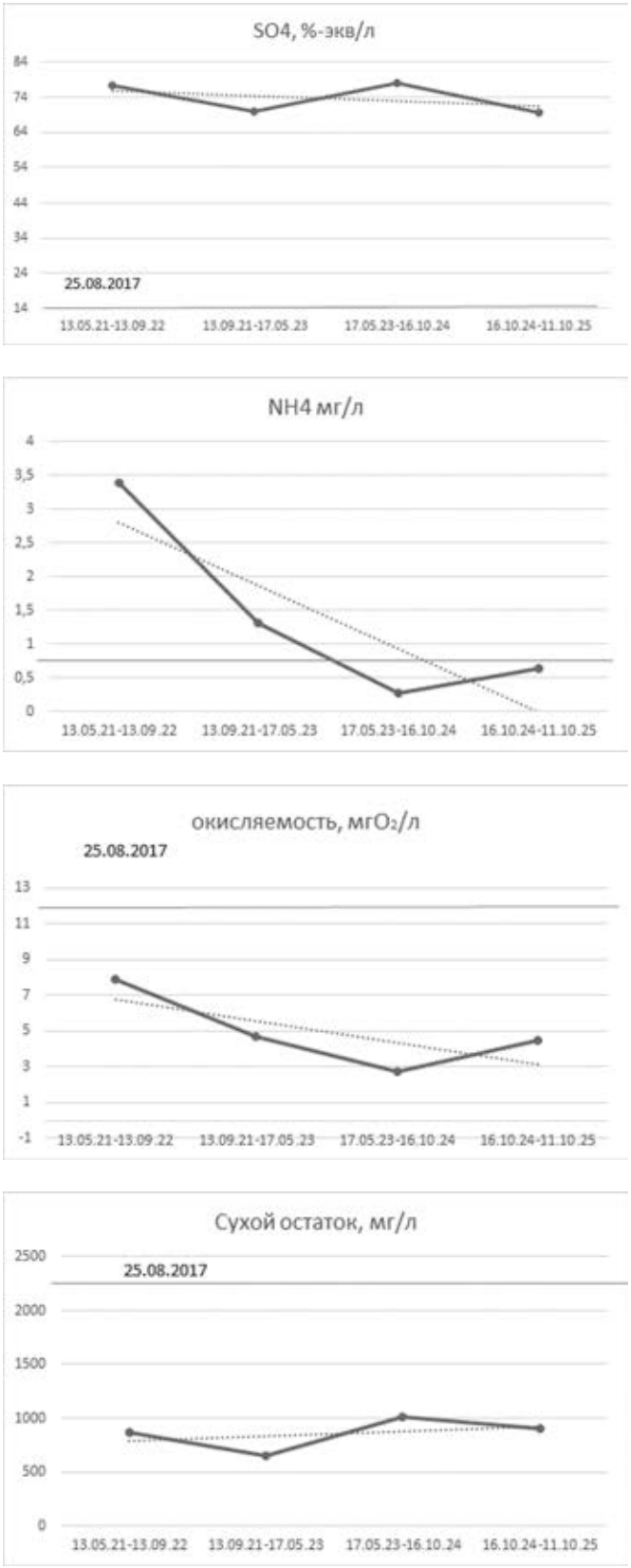


Рис. 4. **Динамика гидрохимических показателей воды, превышавших предельно допустимые концентрации по СанПиН 2.1.3685-21 /**
Fig. 4. **Dynamics of hydrochemical water parameters exceeding MAC under SanPiN 2.1.3685-21**

Отмечено, что относительная доля сульфат-ионов в анионном составе воды возросла, однако их абсолютная концентрация снизилась: если в 2017 году содержание сульфатов составляло 768 мг/л, то усредненное значение за 2025 год сократилось до 327,33 мг/л.

На современном этапе жидкая фаза закладочного материала характеризуется хлоридно-сульфатным типом минерализации, относится к категории пресных вод с величиной сухого остатка 0,89 г/л и имеет щелочную реакцию среды с pH 8,49 (для сравнения: в 2017 году значение pH составляло 9,0).

Таким образом, на протяжении восьмилетнего периода заполнения выработанного пространства разреза ухудшения качества воды в формирующемся техногенном водоеме не зафиксировано, что свидетельствует о достоверности выполненных ранее прогнозных оценок. Заполнение карьерной выемки закладочным материалом обеспечивает одновременно несколько положительных эффектов: подавление очагов эндогенного горения в угольных породах, повышение устойчивости бортов вследствие пригрузки их нижней части твердой фазой закладки, а также рост щелочности воды в техногенном водоеме, что приводит к снижению миграционной активности соединений тяжелых металлов.

Уральским филиалом Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевым научным центром ВНИМИ проведена научно-исследовательская работа по геомеханической оценке фактического состояния бортов разреза «Коркинский» и прилегающей территории, а также прогнозная оценка влияния проектных решений по ликвидации разреза на устойчивость его бортов. По результатам прогноза сделаны выводы об обеспечении устойчивости бортов разреза и рекомендации по порядку его ликвидации.

Специалистами Санкт-Петербургского горного университета дана оценка технологической возможности и экологической безопасности реализации проекта. В настоящее время сотрудниками университета ведется научное сопровождение и регулярный контроль выполнения работ по ликвидации, в том числе геомеханический и деформационный контроль бортов разреза и прибортового массива, а также оценка экологического состояния природной среды в районе ликвидируемой горной выработки.

Заключение

1. Обоснована необходимость создания сопряженных геолого-структурных, геомеханических, гидрогеологических и гидрохимических моделей. Особую роль играет применение имплицитных методов моделирования литологических разностей на основе радиально-базисных функций (РБФ), обеспечивающих высокую точность даже при неравномерной сети скважин.

2. Представлен математический аппарат оценки водного баланса через систему балансовых уравнений, аппроксимированную конечно-разностными аналогами с суточным шагом. Такой подход позволяет прогнозировать динамику запасов подземных вод и интенсивность их питания на основе доступных метеоданных.

3. Практическая значимость подхода подтверждена на примере объединенной горнотехнической системы «Томинский ГОК – Коркинский разрез», где использование хвостов обогащения для закладки выработанного пространства угольного разреза позволило достичь нулевого сброса сточных вод, ликвидировать эндогенные пожары, обеспечить устойчивость бортов и долгосрочную экологическую реабилитацию территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Трубецкой К.Н., Корнилков С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства. *Горный журнал*. 2012; (1): 15-19.
   Trubetskoy K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. On new approaches to ensuring sustainable development of mining operations. *Mining Journal*. 2012; (1): 15-19. (In Russ.).
2. Шайлиева М.М., Кадыргулов Р.Р. Состояние и проблемы горнодобывающей промышленности. *Экономика*: *вчера*, *сегодня*, *завтра*. 2024; 14 (11А): 212-225. https://doi.org/10.34670/AR.2024.67.68.024.
   Shailieva M.M., Kadyrgulov R.R. State and problems of the mining industry. *Economics: Yesterday, Today, Tomorrow.* 2024; 14 (11A): 212-225. (In Russ.). https://doi.org/10.34670/AR.2024.67.68.024.
3. Федосеева С.С. Устойчивое развитие экономики промышленного комплекса: экологическое измерение и экосистемные эффекты. Отв. ред. А.А. Урасова. Екатеринбург, 2025: 212.
   Fedoseeva S.S. Sustainable Economic Development of the Industrial Complex: Environmental Dimension and Ecosystem Effects. Ed. by A. A. Urasova. Yekaterinburg, 2025. (In Russ.).
4. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Развитие теоретических основ проектирования горнотехнических систем для их устойчивого долговременного функционирования. *50 лет российской научной школе комплексного освоения недр Земли: мат-лы Межд. науч.-практ. конф.* Москва, 2017: 345-350.
   Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Development of theoretical foundations for designing mining systems for their sustainable long-term operation. *50 Years of the Russian Scientific School of Integrated Development of Earth Subsurface: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference.* Moscow, 2017: 345-350. (In Russ.).
5. Юдаев И.В., Сангаджиева С.А., Гермашева Ю.С. и др. Моделирование потоков загрязняющих веществ при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. *Известия ТулГУ*. *Науки о Земле*. 2025; 4: 68-73.
   Yudaev I.V., Sangadzhieva S.A., Germasheva Yu.S., et al. Modeling pollutant flows during open-pit mining of mineral deposits. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (4): 68-73. (In Russ.).
6. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проблемы самореабилитации гидросферы и очистки шахтных вод на постэксплуатационном этапе (на примере Левихинского рудника, Средний Урал). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 3-1: 488-500. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500.
   Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Issues of hydrosphere self-rehabilitation and mine water treatment at the post-operational stage (on the example of Levikhinsky mine, Middle Urals). *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2020; (3-1): 488-500. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500.

7. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2025; 67 (1): 76-85. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.
Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Main directions of complementarity between digitalization methods and geoinformation support for mining production. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration.* 2025; 67 (1): 76-85. (In Russ.). https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.
8. Киреева Г.И. Нейросетевое моделирование деформаций горных выработок в условиях ограниченных данных. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2025; (3): 200-205.
Kireeva G.I. Neural network modeling of mine working deformations under conditions of limited data. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (3): 200-205. (In Russ.).
9. Качурин Н.М., Воробьев С.А., Факторович В.В. Теоретические положения и модели воздействия на окружающую среду подземной добычи полезных ископаемых. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2013; (3): 3-17.
Kachurin N.M., Vorobiev S.A., Faktorovich V.V. Theoretical principles and models of environmental impact of underground mineral mining. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2013; (3): 3-17. (In Russ.).
10. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Пономаренко М.Р. и др. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений. *Горный журнал*. 2023; (5): 69-74. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.10.
Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Ponomarenko M.R., et al. Geomechanical monitoring of pit wall and dump stability in coal deposit development. *Mining Journal.* 2023; (5): 69-74. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.10.
11. Назарова Л.Р. Прогнозирование геоэкологических параметров горнодобывающих объектов с применением статистических и нейросетевых методов. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2025; 4: 119-124.
Nazarova L.R. Forecasting geoecological parameters of mining facilities using statistical and neural network methods. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (4): 119-124. (In Russ.).
12. Кукарцев В.В., Прудкий А.С., Никаноров М.С. и др. Прогнозирование геоэкологических рисков карьерных территорий на основе гибридной модели машинного обучения. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2025; (4): 80-85.
Kukartsev V.V., Prudky A.S., Nikanorov M.S., et al. Forecasting geoecological risks of quarry areas based on a hybrid machine learning model. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (4): 80-85. (In Russ.).
13. Aghdamigargari M., Avane S., Anani A., et al. Sustainability in Long-Term Surface Mine Planning: A Systematic Review of Operations Research Applications. *Sustainability*. 2024; 16 (22): 9769. https://doi.org/10.3390/su16229769.
14. Гончар Н.В., Четверкин И.А., Вишняк А.И. и др. Оценка защищенности водной среды при разработке крупных месторождений медно-порфировых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (12-2): 16-26. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_16.
Gonchar N.V., Chetverkin I.A., Vishnyak A.I., et al. Assessment of aquatic environment protection in the development of large porphyry copper ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2023; (12-2): 16-26. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_16.
15. Bond A., Retief F.P., Alberts R.C., et al. What would environmental impact assessment look like if we started from scratch today? Designing better EIA for developed neoliberal nations. *Impact Assessment and Project Appraisal*. 2024; 42 (5): 410-422. https://doi.org/10.1080/14615517.2024.2426117.
16. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition. 2015: 564.
17. Соколовский А.В., Лапаев В.Н., Темникова М.С. и др. Технологические особенности ликвидации разреза «Коркинский». *Уголь*. 2018; 3 (1104): 91-95. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-91-95.
Sokolovsky A.V., Lapaev V.N., Temnikova M.S., et al. Technological features of decommissioning the Korkinsky open-pit coal mine. *Coal.* 2018; 3 (1104): 91-95. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-91-95.
18. Penman J., Sanders J. Integration of 'safe closure' into the selection of a new tailings storage facility. *Mine Closure 2025*: *Proceedings*. Australian Centre for Geomechanics, 2025. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2515_69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Наталия Валерьевна Гончар –
канд. техн. наук, вице-президент по инжинирингу и экологической безопасности, АО «Русская медная компания», г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: info@rcc-group.ru

Сергей Викторович Корнилков –
д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: kornilkov@igduran.ru

Игорь Афанасьевич Четверкин –
директор, ООО «НПФ «Мониторинг месторождений полезных ископаемых», г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: npf_mmpi@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Natalia V. Gonchar –
Cand. Sci. (Eng.), Vice President for Engineering and Environmental Safety, Russian Copper Company JSC, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: info@rcc-group.ru

Sergey V. Kornilkov –
Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IM UB RAS), Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kornilkov@igduran.ru

Igor A. Chetverkin –
Director, "Monitoring of Mineral Deposits" Research and Production Firm LLC, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: npf_mmpi@mail.ru

Вячеслав Анатольевич Пикалов –
начальник отдела, ООО «Научно-технический центр – Геотехнология», г. Челябинск, Российская Федерация: e-mail: pikalov@ustup.ru

Критерии авторства:
Н. В. Гончар – идея и методология исследований, формулировка новых фактов; С. В. Корнилков – постановка задачи, руководство исследованием; И. А. Четверкин – формулировка новых фактов, анализ результатов; В. А. Пикалов – анализ результатов; научное редактирование.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.08.2026
Поступила после рецензирования: 21.09.2026
Принята к публикации: 27.09.2026

Vyacheslav A. Pikalov *–*
Head of Department, "Scientific and Technical Center – Geotechnology" LLC, Chelyabinsk, Russian Federation; e-mail: pikalov@ustup.ru

Contribution:
N. V. Gonchar – research concept and methodology, formulation of new facts; S. V. Kornilkov – problem statement, research supervision; I. A. Chetverkin – formulation of new facts, data analysis; V. A. Pikalov – data analysis, scientific editing.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 04.08.2026
Revised: 21.09.2026
Accepted: 27.09.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 551.24:553.98
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-98-104

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 551.24:553.98

Комплексная методика исследования разломно-блоковой тектоники и ее влияния на нефтегазоносность

М. В. Андреев✉[1], В. П. Петрищев[1, 2], Г. А. Пономарева[1]
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация
[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Оренбургский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук, г. Оренбург, Российская Федерация
✉ *makcimandreev147@gmail.com*

Резюме. Рассматривается комплексный подход к исследованию разломно-блоковой тектоники и оценке ее влияния на нефтегазоносность осадочных бассейнов платформенных областей на примере Южного Предуралья. Показана необходимость совместного анализа данных сейсморазведки МОГТ-2D/3D, атрибутного анализа, гравимагнитных материалов, дистанционного зондирования Земли, геодинамического мониторинга и промыслово-геологических данных. Предложена последовательность работ, включающая картирование погребенных нарушений, уточнение глубинного строения фундамента, оценку напряженно-деформированного состояния и верификацию прогнозных зон по данным бурения и разработки. Особое внимание уделено приразломным зонам трещиноватости как одному из факторов формирования коллекторов с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами. Количественные показатели эффективности методики рассматриваются как расчетно-интерпретационные оценки, требующие уточнения при расширении массива производственных данных. Практическое значение подхода состоит в повышении обоснованности прогноза трещинных коллекторов и учета разломов при построении геологических и гидродинамических моделей. Результаты исследования могут быть использованы при выборе участков для детального изучения, обосновании размещения поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, а также при уточнении геологических и гидродинамических моделей месторождений.

Ключевые слова: разломно-блоковая тектоника, трещинные коллекторы, геодинамическое моделирование, атрибутный анализ сейсмических данных, геодинамический мониторинг, прогноз нефтегазоносности, Южное Предуралье, интеграция геолого-геофизических данных, приразломные зоны, фильтрационно-емкостные свойства

Для цитирования: Андреев М.В., Петрищев В.П., Пономарева Г.А. Комплексная методика исследования разломно-блоковой тектоники и ее влияния на нефтегазоносность. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 98-104. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-98-104.

Integrated methodology for studying fault-block tectonics and its influence on petroleum potential

M. V. Andreev✉[1], V. P. Petrishchev[1, 2], G. A. Ponomareva[1]
[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University named after V. A. Bondarenko", Orenburg, Russian Federation
[2]Federal State Budgetary Institution of Science Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation
✉ *makcimandreev147@gmail.com*

Abstract. The article considers an integrated approach to the study of fault-block tectonics and its influence on petroleum potential in platform sedimentary basins, using the Southern Pre-Urals as an example. The approach combines 2D/3D CDP seismic data, seismic attributes, gravity and magnetic data, remote sensing, geodynamic monitoring, well logging, core and production data. The proposed workflow includes mapping buried faults, refining the basement structure, assessing the stress-strain state and verifying predicted fractured zones using drilling and production information. Special attention is paid to near-fault fractured zones as a factor

© Андреев М. В., Петрищев В. П., Пономарева Г. А., 2026

controlling reservoirs with improved reservoir properties. Quantitative efficiency indicators are treated as calculation and interpretation estimates that require additional calibration using production data. The practical significance of the approach consists in improving the justification of fractured reservoir prediction and fault representation in geological and hydrodynamic models. The results can be used to select areas for detailed study, substantiate the placement of exploration, appraisal and production wells, and refine geological and hydrodynamic reservoir models.

Keywords: fault-block tectonics, fractured reservoirs, geodynamic modelling, seismic attribute analysis, geodynamic monitoring, petroleum potential prediction, Southern Pre-Urals, geological and geophysical data integration, near-fault zones, reservoir properties

For citation: Andreev M.V., Petrishchev V.P., Ponomareva G.A. Integrated methodology for studying fault-block tectonics and its influence on petroleum potential. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 98-104. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-98-104.

Введение

В условиях прогрессирующего истощения фонда крупных антиклинальных структур в старых нефтегазоносных провинциях основным резервом прироста запасов становятся сложнопостроенные, в том числе неструктурные ловушки, контролируемые тектоническими, литологическими и стратиграфическими факторами. Для платформенных областей особенно важны зоны развития трещиноватости, связанные с разломами фундамента и их проявлениями в осадочном чехле [1–3].

Южное Предуралье является показательным районом для такого анализа. Здесь сочетаются длительная история геологоразведочных работ, сложное строение фундамента, унаследованный характер осадочного чехла, наличие крупных месторождений углеводородов и проявления современной геодинамической активности [2–4]. В результате многолетнего изучения Южного Предуралья накоплен значительный фонд геолого-геофизической информации, включающий материалы параметрического бурения, сейсморазведки различных модификаций, гравимагниторазведки, дистанционного зондирования Земли и геодинамического мониторинга [1–7]. Однако при раздельной интерпретации эти данные не всегда позволяют корректно учитывать разломно-блоковый фактор как системообразующий элемент геологической среды.

Современный подход требует перехода от простого сопоставления разрозненных материалов к их синтетической интеграции в рамках единой геодинамической модели. Основой такой модели является принцип тектонической унаследованности: древние разломы фундамента неоднократно активизировались и могли контролировать структурный план осадочного чехла, распределение напряжений, трещиноватость и миграционные пути углеводородов [2, 3].

В отличие от подходов, ограниченных построением структурных карт, рассматриваемая методика ориентирована на совместную интерпретацию геологических, геофизических, дистанционных, геодинамических и промысловых данных. Следует подчеркнуть, что предлагаемый подход не подменяет производственную верификацию и не претендует на универсальную количественную модель для всех объектов. Его задача – сформировать воспроизводимую последовательность анализа, позволяющую повысить достоверность выделения зон приразломной трещиноватости и уточнить геометризацию резервуаров.

Цель работы: представить комплексную методику исследования разломно-блоковой тектоники и оценки ее влияния на формирование, размещение и продуктивность залежей углеводородов.

Методика исследований

Принципы интеграции геолого-геофизических данных

Для локального картирования разломов важна переинтерпретация данных сейсморазведки МОГТ-2D/3D с применением атрибутного анализа. Размещение сейсмических станций, используемых для мониторинга региона, показано на рисунке 1.

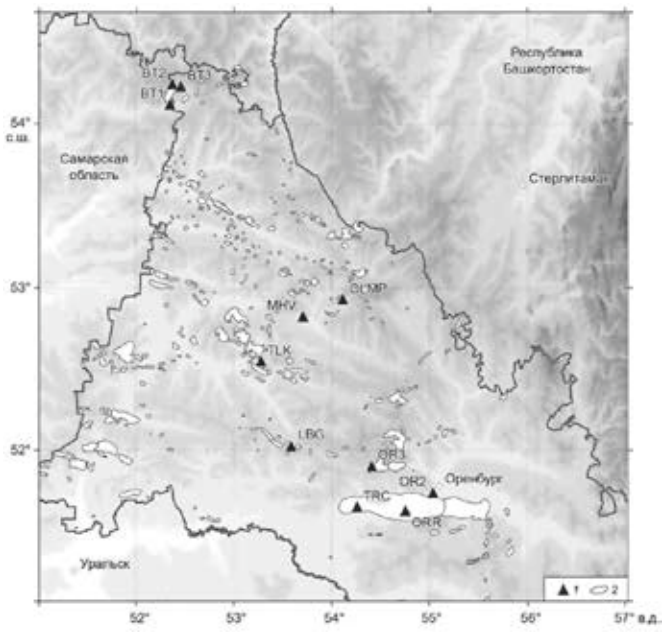


Рис. 1. **Размещение стационарных сейсмических станций сети «Нефтегаз-сейсмика»: 1 – стационарные станции; 2 – нефтяные и нефтегазоконденсатные месторождения Оренбургской области /**
Fig. 1. **Locations of permanent seismic stations of the "Neftegaz-Seismika" network: 1 – permanent stations; 2 – oil and oil-and-gas-condensate fields of the Orenburg Region**

Атрибуты когерентности, кривизны и спектрального разложения позволяют выявлять линейные аномалии, которые могут соответствовать зонам разломов и повышенной трещиноватости. Пример использования куба когерентности для выделения нарушений приведен на рисунке 2.

Методы картирования погребенных разломов

Для выявления погребенных тектонических нарушений в Южном Предуралье целесообразно применять комплекс взаимодополняющих методов, каждый из которых имеет собственную разрешающую способность и область применения.

Атрибут когерентности является одним из основных инструментов выявления разрывных нарушений. Он рассчиты-

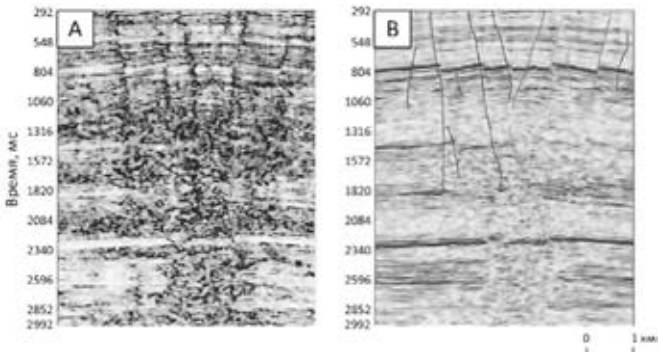


Рис. 2. **Куб когерентности и результат выделения нарушений /**
Fig. 2. **Coherence cube and the result of fault identification**

вает степень подобия формы соседних сейсмических трасс; в зонах нарушения сплошности среды значение когерентности снижается, что проявляется на картах и кубах атрибута в виде линейных аномалий.

Спектральное разложение и атрибут кривизны дополняют анализ когерентности. Спектральное разложение помогает фиксировать зоны повышенного поглощения, а кривизна отражающих горизонтов указывает на участки изгиба, растяжения и локальной деформации пластов.

Гравимагниторазведка позволяет уточнять глубинное строение фундамента и трассировать зоны, которые могут не иметь прямого выражения в осадочном чехле, но контролируют его структуру опосредованно [3, 5, 6]. Интеграция данных дистанционного зондирования Земли, включая Landsat и Sentinel, с сейсмическими материалами позволяет дополнительно выявлять линеаменты и морфоструктурные признаки активных или унаследованных нарушений. Пример структурного дешифрирования линеаментов территории Оренбургской области приведен на рисунке 3.

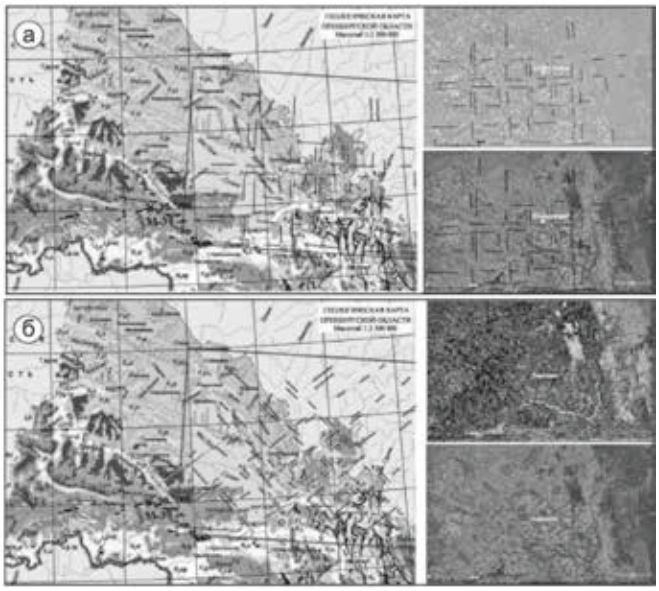


Рис. 3. **Результат структурного дешифрирования линеаментов территории Оренбургской области на основе цветотоновых индикаторов и их сопоставления с геологическими данными:**
а – выделение ортогональной системы линеаментов;
б – выделение диагональной системы линеаментов /
Fig. 3. **Results of structural interpretation of lineaments in the Orenburg Region based on colour-tone indicators and their comparison with geological data:**
a – identification of the orthogonal lineament system;
b – identification of the diagonal lineament system

Методология геодинамического моделирования

Геодинамическое моделирование базируется на принципах механики сплошных сред и тектонофизики с учетом реологических свойств геологической среды, стратифицированности разреза и наличия разломно-блоковой структуры фундамента. В платформенных областях особенно важно учитывать, что разломы фундамента могут проявляться в осадочном чехле не только в виде крупных смесителей, но и через зоны повышенной трещиноватости, флексурные деформации и изменение фильтрационных свойств.

Схема разломов осадочного чехла Волго-Уральской антеклизы представлена на рисунке 4. Она используется как структурная основа для сопоставления региональных элементов с локальными зонами нефтегазоносности и уточнения роли разломов в пределах Южного Предуралья.



Рис. 4. **Схема разломов осадочного чехла Волго-Уральской антеклизы. Составлено автором с использованием опубликованных и фондовых материалов;**
структурные элементы приведены по классификации Н. С. Шатского /
Fig. 4. **Fault map of the sedimentary cover of the Volga-Ural anteclise. Compiled by the author using published and archival materials; structural elements are shown according to the classification of N. S. Shatsky**

Для анализа глубинной основы модели важна тектоническая схема кристаллического фундамента Южного Предуралья (рис. 5). Она взята как базовая основа по материалам монографии «Геологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области» [6], поскольку данное издание содержит обобщенные сведения о литологии, стратиграфии, тектонике и нефтегазоносности западных районов Оренбургской области.

Построение геодинамической модели имеет в основе три взаимосвязанных блока:

– структурно-геометрическое моделирование, включающее поверхность фундамента, основные стратиграфические границы, разломные зоны и участки повышенной трещиноватости;

– анализ напряженно-деформированного состояния с применением тектонофизических и геомеханических подходов;

– ретроспективный анализ геодинамического развития, позволяющий установить этапы активизации разломной тектоники и ее возможное влияние на формирование ловушек.



Рис. 5. **Тектоническая схема кристаллического фундамента Южного Предуралья [6]: 1 – граница Жигулевско-Оренбургского свода; 2 – граница передовых складок Урала; 3 – границы разделения додевонской поверхности; 4 – линии тектонических нарушений по данным геофизики; 5 – изогипсы додевонской поверхности; 6 – изогипсы кровли кристаллического фундамента; 7 – гряды-останцы поверхности кристаллического фундамента; 8 – выступы кристаллического фундамента /**

Fig. 5. **Tectonic map of the crystalline basement of the Southern Pre-Urals [6]: 1 – boundary of the Zhiguli-Orenburg arch; 2 – boundary of the foreland folds of the Urals; 3 – subdivision boundaries of the pre-Devonian surface; 4 – tectonic lineaments identified from geophysical data; 5 – isohypses of the pre-Devonian surface; 6 – isohypses of the top of the crystalline basement; 7 – residual ridges of the crystalline-basement surface; 8 –crystalline-basement highs**

Оценка влияния тектонических нарушений на геометризацию резервуаров

Для оценки влияния разломов на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов предлагается пятиэтапная последовательность работ. Она ориентирована не на формальное нанесение разломов на карту, а на определение их фильтрационной роли: проводящей, экранирующей или комбинированной.

Выделяется следующая последовательность работ:

– этап 1. Выявление и классификация тектонических нарушений по комплексу геолого-геофизических данных с учетом ранга, простирания и кинематики;

– этап 2. Анализ пространственного распределения ФЕС в зонах влияния тектонических нарушений и вне их по данным керна, ГИС и гидродинамических исследований скважин;

– этап 3. Геомеханическое моделирование для реконструкции поля напряжений и оценки вероятного распределения трещиноватости;

– этап 4. Количественная оценка влияния нарушений на анизотропию фильтрационных свойств, плотность трещиноватости и степень гидродинамической связности блоков;

– этап 5. Верификация построенных моделей по результатам бурения, испытаний и динамики разработки.

Разработка критериев прогноза зон развития трещинных коллекторов

Концептуальной основой прогнозирования служит принцип тектонической унаследованности. В рамках предлагаемого подхода пространственное распределение трещиноватости рассматривается как результат взаимодействия древнего структурного плана фундамента, последующей активизации нарушений и современных геодинамических процессов.

Система анализа включает три уровня детальности:

– макроуровень – региональный структурный план, выявление глубинных разломов по данным дистанционного зондирования, гравимагнитных материалов и обзорных геологических схем;

– мезоуровень – локальные структурные элементы, картируемые по сейсмическим атрибутам, кривизне отражающих горизонтов и зоне влияния погребенных нарушений;

– микроуровень – петрофизические особенности коллекторов, включая данные керна, ГИС, трещиноватости, пористости, проницаемости и гидродинамических исследований.

В качестве индикаторов трещинной проницаемости используются структурно-геоморфологические маркеры, градиенты потенциальных полей, зоны пониженной когерентности, участки повышенной кривизны, данные о поглощениях бурового раствора, а также признаки двойной пористости по результатам гидродинамических исследований.

Результаты апробации методики и ее анализ

Возможности атрибутного анализа сейсмических данных

Применение атрибутного анализа на объектах Южного Предуралья позволяет уточнять положение малоамплитудных нарушений, которые слабо выражены на стандартных сейсмических разрезах. Наиболее информативными являются сочетания атрибутов когерентности, кривизны и спектрального разложения.

Сопоставление выделенных нарушений с промысловой информацией показывает, что повышенная продуктивность ряда скважин может быть связана с положением относительно приразломных зон. В рамках статьи количественные показатели рассматриваются как интерпретационные оценки, полученные при обобщении доступных материалов, а не как окончательная производственная статистика. Использование промысловых данных Оренбургского НГКМ при анализе эффективности разработки представлено, в частности, в работе [8].

Закономерности влияния разломов на ФЕС

В приразломных зонах карбонатных коллекторов возможно развитие повышенной эффективной проницаемости за счет открытой трещиноватости. Наибольший интерес представляют зоны пересечения разломов различной ориентировки, где создаются условия для концентрации напряжений и формирования разуплотненных интервалов. Влияние тектонической структуры и геодинамической эволюции на формирование скоплений углеводородов в Предуральском прогибе рассмотрено в работах [9, 10].

Вместе с тем влияние разлома не является однозначно положительным. В зависимости от состава пород, амплитуды

смещения, наличия глинизации и современного напряженного состояния разлом может быть как проводящим, так и экранирующим элементом. Поэтому прогноз должен учитывать не только геометрию нарушений, но и их возможные фильтрационные свойства.

Система прогнозных критериев

На основе обобщения данных предлагается система критериев прогноза зон развития трещинных коллекторов.

Она включает четыре группы индикаторов:

– структурно-геоморфологические: линеаменты, радиальный рисунок дренажной сети, изменение плотности овражно-балочной сети, положение относительно узлов пересечения нарушений;

– геофизические: зоны пониженной когерентности, участки повышенной кривизны, градиенты гравитационных и магнитных полей, аномалии спектральных характеристик;

– геодинамические: приуроченность к эпицентрам современной сейсмичности, современным смещениям и зонам возможной реактивации;

– промысловые: повышенные дебиты, поглощения бурового раствора, открытая трещиноватость в керне и признаки двойной пористости по данным ГДИС.

Практическая реализация и ограничения применения

Апробация методики на объектах Южного Предуралья показывает ее применимость для уточнения зон повышенной трещиноватости, выбора участков детализации и включения разломов в геологические и гидродинамические модели. В расчетно-интерпретационном варианте применение комплекса признаков может повышать достоверность прогноза зон улучшенных ФЕС и снижать риск заложения скважин вне перспективных приразломных зон. Региональные оценки нефтегазового потенциала складчато-надвиговых зон Урала и особенности верхнедевон-нижнепермских и ассельских нефтегазоносных комплексов рассмотрены в работах [11–15].

При этом итоговая эффективность зависит от качества исходных данных, плотности сети скважин, разрешающей способности сейсмического материала и полноты промысловой статистики. Поэтому количественные значения эффективности следует рассматривать как предварительные оценки, подлежащие уточнению при расширении производственной базы данных.

Заключение

1. Предложенный комплексный подход к исследованию разломно-блоковой тектоники представляет собой многоуровневую систему анализа, адаптированную к геологическим условиям платформенных нефтегазоносных областей. Ключевыми элементами подхода являются переинтерпретация данных сейсморазведки с применением атрибутного анализа, совместное использование гравимагнитных материалов, геомеханическое моделирование, дистанционное зондирование и промысловая верификация.

2. Показано, что приразломные зоны трещиноватости могут играть существенную роль в формировании коллекторов с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами, особенно в карбонатных толщах с низкой фоновой матричной проницаемостью. Установлено, что при прогнозе трещинных коллекторов необходимо использовать не один признак, а согласованную систему структурных, геофизических, геодинамических и промысловых индикаторов. Разломы целесообразно учитывать в геологических и гидродинамических моделях не только как геометрические поверхности, но и как элементы с различной фильтрационной ролью: проводящей, экранирующей или комбинированной.

3. Перспективы дальнейшего развития методики связаны с накоплением производственных данных, построением динамических 4D-моделей и применением алгоритмов машинного обучения для автоматизации анализа больших массивов геолого-геофизической информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Волжанин В.Г., Горожанин В.М. Разрывная тектоника и нефтегазоносность Предуральского краевого прогиба. *Геология нефти и газа.* 2020; 3: 72-83.
   Volzhanin V.G., Gorozhanin V.M. Discontinuous tectonics and oil and gas potential of the Pre-Ural regional trough. *Geology of oil and gas.* 2020; 3: 72-83. (In Russ.).
2. Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Светлакова А.Н. Роль неотектоники в формировании ловушек углеводородов в зоне сочленения Волго-Уральской антеклизы и Предуральского прогиба. *Литосфера*. 2018; 18 (4): 592-606.
   Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Svetlakova A.N. The role of neotectonics in the formation of hydrocarbon traps in the junction zone of the Volga-Ural anteclise and the Pre-Ural trough. *Lithosphere.* 2018; 18 (4): 592-606. (In Russ.).
3. Лозин Е.В. Тектоника и нефтегазоносность Башкортостана. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2001; 4: 8-13.
   Lozin E.V. Tectonics and oil and gas potential of Bashkortostan. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields.* 2001; 4: 8-13. (In Russ.).
4. Соколов А.Г. Выделение и трассирование тектонических нарушений по данным сейсморазведки для прогноза приразломных ловушек в платформенном Оренбуржье. *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2010; 63: 15-21.
   Sokolov A.G. Identification and tracing of tectonic disturbances according to seismic survey data for predicting fault traps in the platform Orenburg region. *Subsoil of the Volga region and the Caspian Sea.* 2010; 63: 15-21. (In Russ.).
5. Геофизическая служба РАН. *Бюллетень сейсмической сети*. Обнинск: ГС РАН, 2000-2023.
   Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences. *Bulletin of the seismic network.* Obninsk: GS RAS, 2000-2023.
6. Геологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области; под ред. Н. Ф. Козлова, А. С. Пантелеева. Оренбург: Оренбургское книжное издательство, 1997: 272.
   Geological structure and oil and gas potential of the Orenburg region; edited by N. F. Kozlov, A. S. Panteleev. Orenburg: Orenburg Book Publishing House, 1997: 272. (In Russ.).
7. Долгов А.А., Шумилов А.В. Система сейсмического мониторинга на месторождениях углеводородов Оренбургской области. *Сейсмические приборы*. 2019; 55 (2): 45-58.

Dolgov A.A., Shumilov A.V. Seismic monitoring system at hydrocarbon deposits in the Orenburg region. *Seismic instruments.* 2019; 55 (2): 45-58. (In Russ.).

8. Утробин Н.В. Прогноз коэффициента извлечения нефти и анализ эффективности ППД Ассельской газонефтяной залежи Оренбургского НГКМ. *Нефтепромысловое дело*. 2007; 9: 36-39.
   Utrobin N.V. Forecast of the oil recovery coefficient and efficiency analysis of the Asselskaya gas and oil deposit of the Orenburg NGKM. *Oilfield business.* 2007; 9: 36-39. (In Russ.).
9. Керимов В.Ю., Кузнецов Н.Б., Мустаев Р.Н. и др. Условия формирования скоплений углеводородов во взбросонадвиговых структурах восточного борта Предуральского прогиба. *Нефтяное хозяйство*. 2017; 7: 36-41. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-36-41.
   Kerimov V.Yu., Kuznetsov N.B., Mustaev R.N., et al. Nefedova A. S. Conditions for the formation of hydrocarbon accumulations in the thrust structures of the eastern side of the Preduralsky trough. *Oil Industry.* 2017; 7: 36-41. (In Russ.). https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-36-41.
10. Кузнецов Н.Б., Керимов В.Ю., Осипов А.В. и др. Эволюция, геодинамика поднадвиговых зон Предуральского краевого прогиба и геомеханическое моделирование формирования скоплений углеводородов. *Геотектоника*. 2018; 3: 3-20. https://doi.org/10.7868/S0016853X18030013.
    Kuznetsov N.B., Kerimov V.Yu., Osipov A.V., et al. Evolution, geodynamics of thrust zones of the Pre-Ural marginal trough and geomechanical modeling of the formation of hydrocarbon accumulations. *Geotectonics.* 2018; 3: 3-20. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0016853X18030013.
11. Александрова Т.В., Яковлев Ю.А., Шибанова А.М. и др. Вероятностная оценка нефтегазового потенциала перспективных территорий складчато-надвиговой зоны Среднего Урала. *Актуальные проблемы нефти* и газа. 2019; 25 (2). https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art6.
    Alexandrova T.V., Yakovlev Yu.A., Shibanova A.M., et al. Probabilistic assessment of the oil and gas potential of promising territories of the folded thrust zone of the Middle Urals. *Actual problems of oil and gas.* 2019; 25 (2). (In Russ.). https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art6.
12. Политыкина М.А., Тюрин А.М., Дроздов В.В. Верхнедевон-нижнепермский карбонатно-терригенный нефтегазоносный комплекс юга Предуральского прогиба, востока Прикаспийской впадины и зоны передовых складок Урала. *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2014; 79: 3-14.
    Politykina M.A., Tyurin A.M., Drozdov V.V. Verkhnedevon-Nizhnepermsky carbonate-terrigenous oil and gas complex in the south of the Pre-Ural trough, east of the Caspian basin and the zone of advanced folds of the Urals. *The bowels of the Volga region and the Caspian Sea.* 2014; 79: 3-14. (In Russ.).
13. Силагина Т.В., Дроздов В.В., Тюрин А.М. и до. Литология и коллекторские свойства отложений ассельского яруса нижней перми зоны передовых складок Южного Урала по результатам бурения параметрической скважины 117 Предуральской. *Недра Поволжья* и Прикаспия. 2012; 72: 12-19.
    Silagina T.V., Drozdov V.V., Tyurin A.M., et al. Lithology and reservoir properties of sediments of the Asselian stage of the lower Permian zone of the advanced folds of the Southern Urals based on the drilling results of parametric well 117 Preduralskaya. *Subsoil of the Volga region and the Caspian Sea.* 2012; 72: 12-19. (In Russ.).
14. Александрова Т.В., Шибанова А.М., Жарков А.М. Складчато-надвиговая зона Урала как один из крупнейших нефтегазоперспективных объектов европейской части России. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2014; 9 (4): 6.
    Alexandrova T.V., Shibanova A.M., Zharkov A.M. The folded-thrust zone of the Urals as one of the largest oil and gas prospective facilities in the European part of Russia. *Oil and Gas Geology. Theory and practice.* 2014; 9 (4): 6. (In Russ.).
15. Лозин Е.В. Газонефтеперспективность башкирского (Южного) Урала в сопоставлении с нефтегазоносностью бассейнов Аппалачей и Скалистых гор Северной Америки. *Нефтяное хозяйство*. 2019; 2: 8-12. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-2-8-12.
    Lozin E.V. The gas and oil prospects of the Bashkir (Southern) Urals in comparison with the oil and gas potential of the Appalachian and Rocky Mountain basins of North America. *Oil Industry.* 2019; 2: 8-12. (In Russ.). https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-2-8-12.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Вадимович Андреев –
аспирант, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация;
e-mail: makcimandreev147@gmail.com

Вадим Павлович Петрищев –
д-р географических наук, профессор кафедры геологии, географии и кадастра, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация

Галина Алексеевна Пономарева –
канд. геол.-минералог. наук, доцент кафедры геологии, географии и кадастра, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», Оренбург, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Maxim V. Andreev –
Postgraduate Student at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University named after V. A. Bondarenko", Orenburg, Russian Federation; e-mail: makcimandreev147@gmail.com.

Vadim P. Petrishchev –
Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Department of Geology, Geography and Cadastre, Orenburg State University named after V. A. Bondarenko, Orenburg, Russian Federation

Galina A. Ponomareva –
Cand. Sci. (Geol.&Mineral.), Associate Professor of the Department of Geology, Geography and Cadastre, Orenburg State University named after V. A. Bondarenko, Orenburg, Russian Federation

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Критерии авторства:
М. В. Андреев – разработка концепции и структуры комплексной методики; формулировка цели и задач исследования; систематизация и интеграция данных сейсморазведки, гравимагнитных исследований, дистанционного зондирования Земли, геодинамического мониторинга и промыслово-геологических исследований; разработка последовательности картирования разломов, геодинамического моделирования и оценки влияния тектонических нарушений на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов; формирование системы критериев прогноза зон развития трещинных коллекторов; визуализация, подготовка первоначального текста и редактирование; В. П. Петрищев – научное руководство, методология исследования, проверка результатов и научное редактирование рукописи; Г. А. Пономарева – анализ геологических материалов, интерпретация данных, проверка результатов и редактирование рукописи. Все авторы прочитали и одобрили окончательную версию рукописи и несут ответственность за содержание работы.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 23.06.2026
Поступила после рецензирования: 21.09.2026
Принята к публикации: 06.10.2026

ABOUT THE AUTHORS

Contribution:
M. V. Andreev – development of the concept and structure of the integrated methodology, formulation of the aim and objectives, systematization and integration of seismic, gravity and magnetic, remote-sensing, geodynamic-monitoring and field geological data, development of the workflow for fault mapping, geodynamic modelling and assessment of the influence of tectonic faults on reservoir properties, formulation of criteria for predicting fractured-reservoir zones, visualization, preparation of the original draft, and editing; V. P. Petrishchev – supervision, research methodology, validation of results, and scientific editing of the manuscript; G. A. Ponomareva – analysis of geological materials, data interpretation, validation of results, and manuscript editing. All authors read and approved the final version of the manuscript and are accountable for its content.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 23.06.2026
Revised: 21.09.2026
Accepted: 06.10.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 551.24:553.98
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-105-112

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 551.24:553.98

Геолого-геодинамические условия формирования месторождений углеводородов в Южном Предуралье

М. В. Андреев[✉1], В. П. Петрищев[1, 2], Г. А. Пономарева[1]
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация
[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Оренбургский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук, г. Оренбург, Российская Федерация
✉ *makcimandreev147@gmail.com*

Резюме. Рассмотрены геолого-геодинамические условия формирования месторождений углеводородов в Южном Предуралье. Проведен комплексный анализ глубинного строения земной коры и разломно-блоковой тектоники кристаллического фундамента, который представлен породами докембрийского и байкальского возрастов и разбит системой региональных разломов на блоки различных порядков. На основе интерпретации гравимагнитных данных и сейсморазведки уточнено положение основных разломных зон (Токовский, Сакмаро-Илекский, система субмеридиональных нарушений), контролирующих унаследованное развитие осадочного чехла. Исследованы особенности строения осадочного чехла, включающего три структурно-вещественных комплекса (подсолевой, межсолевой и надсолевой), мощность которых закономерно увеличивается с запада на восток от 2–3 до 10–12 км. Показана унаследованная связь между блоковой структурой фундамента и формированием локальных поднятий в осадочном чехле. На основе анализа пространственного распределения известных месторождений (Большекинельская и Камелик-Чаганская зоны) установлена их четкая приуроченность к зонам влияния глубинных разломов и узлам их пересечения. Обоснована определяющая роль приразломных зон трещиноватости в формировании коллекторов с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами и создании ловушек углеводородов различного типа. Данные сейсмического мониторинга и спутниковой геодезии (GPS/GNSS) свидетельствуют о современной геодинамической активности региона (скорости движений – 2–4 мм/год, сейсмичность M_w = 1,5–3,0), что оказывает непосредственное влияние на перераспределение флюидов и параметры разработки месторождений. Предложена обобщенная модель контроля нефтегазонакопления разломно-блоковой тектоникой, включающая каркасную функцию разломов, контроль седиментации и литогенеза, создание путей миграции углеводородов и формирование ловушек. Практическое применение модели позволит повысить эффективность прогноза и поиска локальных объектов, контролируемых тектоническими нарушениями, особенно на поздних стадиях изучения региона.

Ключевые слова: разломно-блоковая тектоника, Южное Предуралье, геодинамика, приразломная трещиноватость, трещинные коллекторы, сейсмичность, нефтегазонакопление, фундамент, осадочный чехол, Оренбургское НГКМ

Для цитирования: Андреев М.В., Петрищев В.П., Пономарева Г.А. Геолого-геодинамические условия формирования месторождений углеводородов в Южном Предуралье. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 105-112. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-105-112.

Geological and geodynamic conditions for the formation of hydrocarbon deposits in the Southern Pre-Urals

M. V. Andreev[✉1], V. P. Petrishchev[1, 2], G. A. Ponomareva[1]
[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University named after V.A. Bondarenko", Orenburg, Russian Federation
[2]Federal State Budgetary Institution of Science Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation
✉ *makcimandreev147@gmail.com*

Abstract. The geological and geodynamic conditions for the formation of hydrocarbon deposits in the Southern Pre-Urals are examined. A comprehensive analysis was carried out of the deep structure of the Earth's crust and the fault-block tectonics of the crystalline basement, which comprises rocks of Precambrian and Baikalian ages and is divided by a system of regional faults into blocks

© Андреев М. В., Петрищев В. П., Пономарева Г. А., 2026

of different orders. Interpretation of gravity and magnetic data and seismic surveys refined the positions of the main fault zones (the Tokovsky and Sakmara-Ilek faults and a system of submeridional faults), which control the inherited development of the sedimentary cover. The structure of the sedimentary cover was investigated; it comprises three structural and lithological complexes (subsalt, intersalt, and suprasalt), whose thicknesses systematically increase from west to east from 2–3 to 10–12 km. An inherited relationship between the block structure of the basement and the formation of local uplifts in the sedimentary cover is demonstrated. Analysis of the spatial distribution of known fields in the Bolshekinelskaya and Kamelik-Chaganskaya zones established their clear association with zones influenced by deep faults and with fault intersections. The decisive role of near-fault fracture zones in forming reservoirs with improved permeability and storage properties and in creating various types of hydrocarbon traps is substantiated. Seismic monitoring and satellite geodesy (GPS/GNSS) data indicate present-day geodynamic activity in the region (movement rates of 2–4 mm/year and seismicity of Mw = 1.5–3.0), which directly affects fluid redistribution and field development parameters. A generalized model of the control of hydrocarbon accumulation by fault-block tectonics is proposed, incorporating the framework function of faults, their control of sedimentation and lithogenesis, the creation of hydrocarbon migration pathways, and trap formation. Practical application of the model will improve the effectiveness of predicting and exploring local targets controlled by tectonic faults, particularly at advanced stages of regional exploration.

Keywords: fault-block tectonics, Southern Pre-Urals, geodynamics, near-fault fracturing, fractured reservoirs, seismicity, hydrocarbon accumulation, basement, sedimentary cover, Orenburg oil-gas-condensate field

For citation: Andreev M.V., Petrishchev V.P., Ponomareva G.A Geological and geodynamic conditions for the formation of hydrocarbon deposits in the Southern Pre-Urals**.** *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 105-112. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-105-112.

Введение

Фундаментальной проблемой современной нефтегазовой геологии является снижение эффективности поисково-разведочных работ в старых нефтедобывающих районах. Традиционная антиклинальная концепция, ориентированная на поиск крупных структур с высокопористыми коллекторами, исчерпала себя для многих платформенных областей, в том числе для Южного Предуралья [1, 10]. На фоне относительно высокой изученности запасов в ловушках структурного типа все более актуальной становится задача выявления сложнопостроенных, в том числе неструктурных ловушек, связанных с зонами трещиноватости.

В Южном Предуралье, несмотря на его платформенный статус, фиксируется современная геодинамическая активность: сейсмические события регистрируются региональной сетью «Нефтегаз-сейсмика», а для наблюдений за деформациями земной поверхности на месторождениях углеводородов используются технологии GPS/GNSS [3, 8].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью пересмотра традиционных моделей нефтегазонакопления при освоении сложнопостроенных месторождений в платформенных областях. Южное Предуралье, несмотря на длительную историю изучения, характеризуется проявлением современной геодинамической активности (сейсмичность M_w = 1,5–3,0, современные движения земной коры – 2–4 мм/год), связь которой с продуктивностью локальных структур изучена недостаточно.

Цель работы: выявить закономерности влияния разломно-блоковой тектоники фундамента и современной геодинамики на формирование и пространственное размещение залежей углеводородов в осадочном чехле Южного Предуралья.

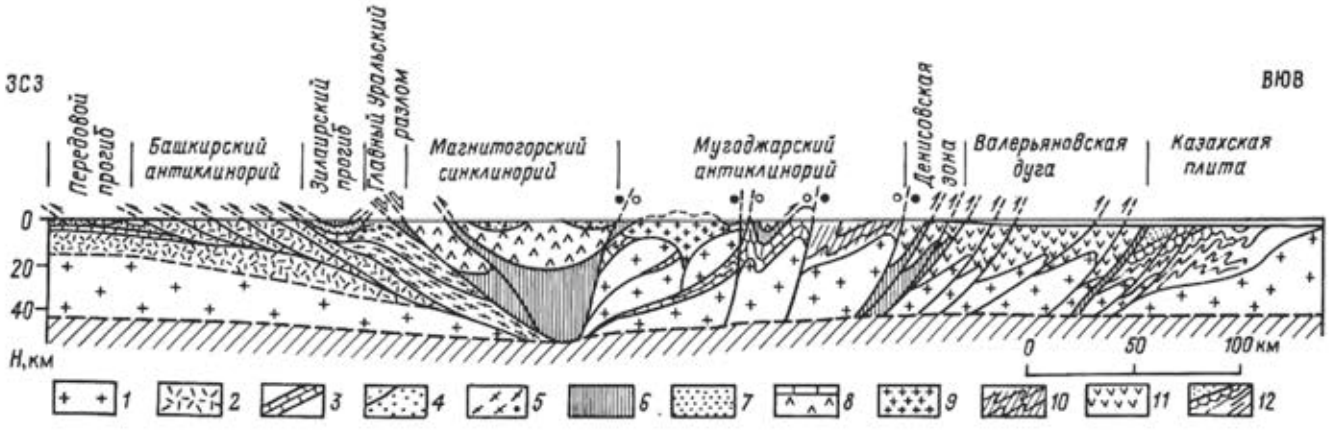


Рис. 1. **Схематический геологический разрез Южного Урала [16]: 1 – докембрийский фундамент; 2 – рифейские осадочные отложения; 3 – шельфовые нижне-среднепалеозойские отложения; 4 – пермо-триасовые отложения; 5 – высокобарические метаморфические гнейсы (Уралтау); 6 – океаническая литосфера; 7 – зилаирский флиш (верхний девон – нижний карбон); 8 – Магнитогорская вулканическая дуга; 9 – граниты; 10 – нижнепалеозойские сланцы; 11 – Валерьяновская вулканическая дуга; 12 – девонско-каменноугольные отложения, несогласно перекрывающие каледонские складчатые структуры Казахского блока /**

Fig. 1. **Schematic geological cross-section of the Southern Urals [16]: 1 – Precambrian basement; 2 – Riphean sedimentary deposits; 3 – Lower–Middle Paleozoic shelf deposits; 4 – Permian–Triassic deposits; 5 – high-pressure metamorphic gneisses (Uraltau); 6 – oceanic lithosphere; 7 – Zilair flysch (Upper Devonian-Lower Carboniferous); 8 – Magnitogorsk volcanic arc; 9 – granites; 10 – Lower Paleozoic shales; 11 – Valeryanovka volcanic arc; 12 – Devonian–Carboniferous deposits unconformably overlying the Caledonian folded structures of the Kazakhstan block**

Объектами исследования являются кристаллический фундамент и осадочный чехол юго-восточного склона Волго-Уральской антеклизы, смежные структуры Южного Предуралья, а также месторождения Большекинельской и Камелик-Чаганской зон. Камелик-Чаганская зона в настоящей работе рассматривается не как элемент Предуральского краевого прогиба, а как объект Южного Предуралья, связанный с системой унаследованных разломов и блоков фундамента.

Общая схема глубинного строения региона приведена на рисунке 1, а разломно-блоковое районирование и материалы геофизического обоснования – на рисунках 2 и 3.

Многочисленные исследования [5, 6] указывают на важную роль разрывной тектоники в формировании зон нефтегазонакопления, однако системного анализа связи между современной геодинамикой, сейсмичностью и фильтрационно-емкостными параметрами коллекторов до настоящего времени не проводилось. Иллюстративные материалы, используемые для обоснования региональной и локальной структуры объекта исследования, представлены на рисунках 2–5.



Рис. 2. **Карта тектонического районирования Предуральского прогиба. Границы тектонических элементов: 1 – крупнейшие (надпорядковые); 2 – крупные (I порядка); 3 – средние (II порядка); 4 – контур работ; 5 – государственная граница Российской Федерации /**

Fig. 2. **Tectonic zoning map of the Pre-Ural Foredeep. Boundaries of tectonic elements: 1 – largest (suprarank); 2 – major (first-order); 3 – medium (second-order); 4 – study area boundary; 5 – state border of the Russian Federation**

Пример интерпретационных планшетов ГИС, используемых для сопоставления разрезов и коллекторских интервалов, приведен на рисунке 4.

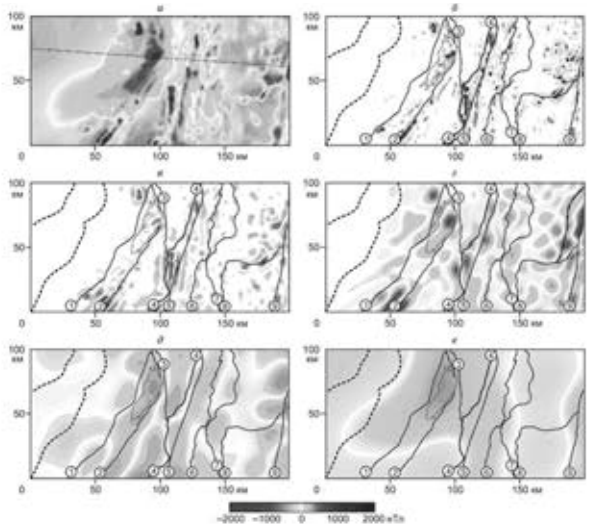


Рис. 3. **Карты аномального магнитного поля (а) и выделенных аномалий от слоев земной коры для глубин 0–2 км (б), 2–5 км (в), 5–10 км (г) и 10–20 км (д), а также региональных аномалий (е). Условные обозначения см. на рис. 1. Штрихпунктирной линией показана протяженная линейная аномалия, созданная ультрабазитовым поясом, верхние кромки которого находятся глубже 5 км (г) [4] /**

Fig. 3. **Maps of the anomalous magnetic field (a) and anomalies separated for crustal layers at depths of 0–2 km (b), 2–5 km (c), 5–10 km (d), and 10–20 km (e), together with regional anomalies (f). For symbols, see fig. 1. The dash-dot line marks an extended linear anomaly produced by an ultrabasic belt, the upper edges of which occur at depths greater than 5 km (d) [4]**

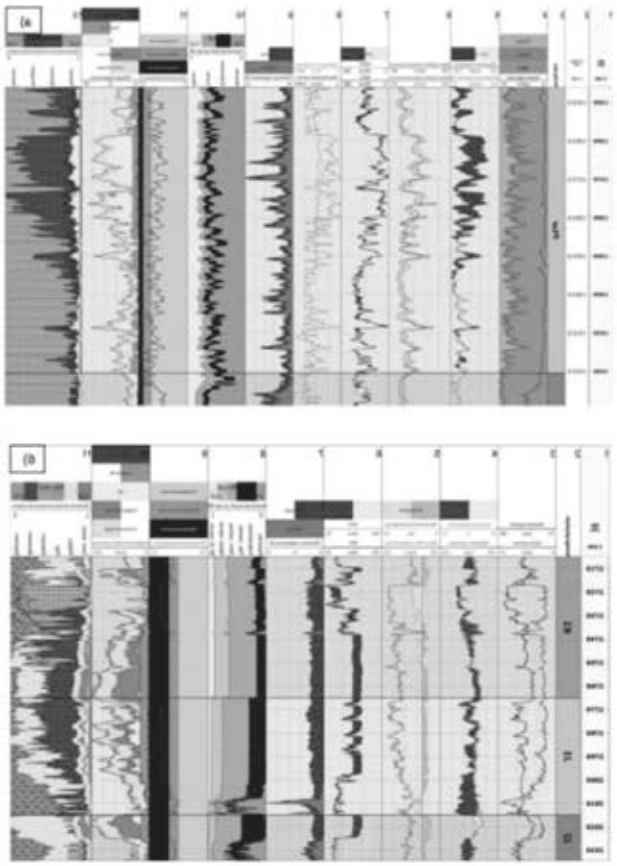


Рис. 4. **Планшеты с результатами интерпретации данных ГИС: а – разрез нижнепермских отложений Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (P1ar, скв. 1-ВМС); б – разрез мезозойских отложений Восточно-Предкавказской НГО [7] /**

Fig. 4. **Panels showing the interpretation of well-log data: a – Lower Permian section of the Orenburg oil and gas condensate field (P1ar, well 1-VMS); b – Mesozoic section of the Eastern Ciscaucasian petroleum province [7]**

Упрощенная схема восточного участка Оренбургского НГКМ приведена на рисунке 5.

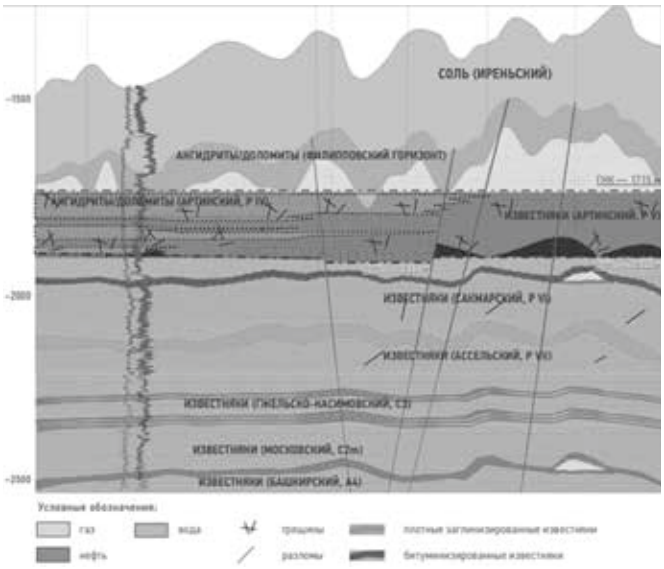


Рис. 5. **Упрощенный схематический разрез восточного участка Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения /**
Fig. 5. **Simplified schematic cross-section of the eastern part of the Orenburg oil and gas condensate field**

Материалы и методы исследования

Методологической основой работы послужил принцип актуализма и тектонической унаследованности. Исследование базировалось на комплексном анализе и интеграции данных, включающих комплексный анализ и переинтерпретацию данных сейсморазведки (МОГТ-2D/3D) с применением атрибутного анализа (когерентность, кривизна, спектральное разложение), гравимагниторазведки (3D-инверсия), данных сейсмологического и GPS/GNSS мониторинга, дешифрирования космоснимков (Landsat-8, Sentinel-2, WorldView) и радарной интерферометрии (InSAR), а также промыслово-геологических данных (керн, ГИС, испытания скважин). Пример использования скважинных материалов и схематический разрез восточного участка Оренбургского НГКМ приведены на рисунке 4 и 5.

В работе использованы следующие материалы:

Геолого-геофизические данные: материалы параметрического и глубокого бурения, литолого-стратиграфические разрезы, данные сейсморазведки МОГТ-2D/3D (включая переинтерпретацию с расчетом атрибутов), карты аномального магнитного поля и гравитационного поля (редукция Буге), листы Госгеолкарты-1000.

Данные дистанционного зондирования Земли: космические снимки среднего и высокого разрешения, цифровые модели рельефа (SRTM, ASTER), данные радарной интерферометрии (InSAR) для оценки современных вертикальных смещений.

Данные геодинамического мониторинга: каталоги сейсмических событий Геофизической службы РАН и локальной сети «Нефтегаз-сейсмика» [8], данные GPS/GNSS-измерений на постоянно действующих станциях.

Промыслово-геологические данные: результаты испытаний скважин, исследования керна (включая определение трещиноватости и фильтрационно-емкостных свойств), данные ГИС, показатели разработки месторождений.

Интерпретация данных проводилась с использованием специализированного программного обеспечения для геологического и гидродинамического моделирования, а также ГИС-технологий.

Результаты исследования и их анализ

Унаследованная разломно-блоковая структура фундамента как каркас осадочного чехла

В результате анализа и 3D-инверсии гравимагнитных данных уточнено глубинное строение кристаллического фундамента Южного Предуралья. Установлено, что он представляет собой мозаику блоков различного состава (гранито-гнейсовых, основных-ультраосновных), разделенных системой глубинных разломов. Для гнейсов правобережья р. Кумак (Марьин Утес) приведены определения абсолютного возраста 1580±65, 1640±40 и 1730±120 млн лет по свинцу, содержащемуся в зернах циркона [2].

Ключевой особенностью фундамента является его неоднородное блоковое строение. Он разбит системой региональных разломов на блоки различных размеров (от первых десятков до сотен километров).

Крупнейшими тектоническими элементами, формирующими основной структурный каркас региона, являются:

Токовский глубинный разлом субширотного простирания, отделяющий приподнятые блоки Приволжской моноклинали от глубокопогруженных блоков Предуральского прогиба. Представляет собой зону шириной несколько километров с интенсивным дроблением пород;

Сакмаро-Илекская зона глубинных нарушений северо-западного простирания, имеющая секущий характер и являющаяся древним трансформным нарушением, неоднократно реактивировавшимся [9];

Система субмеридиональных разломов, унаследованных от рифейских авлакогенов (Кинель-Черкасская, Домашкинско-Раевская системы), контролирующих расположение одноименных впадин и валов в осадочном чехле [5].

На картах аномального магнитного поля (АМП) и гравитационного поля (редукция Буге) разломно-блоковая структура фундамента проявляется в виде мозаики локальных аномалий различной интенсивности, формы и знака, границы между которыми интерпретируются как зоны разломов [4, 10]. Основные элементы разломно-блокового строения и их геофизическое выражение показаны на рисунке 1–3; положение основных залежей Оренбургского НГКМ приведено на рисунке 6.

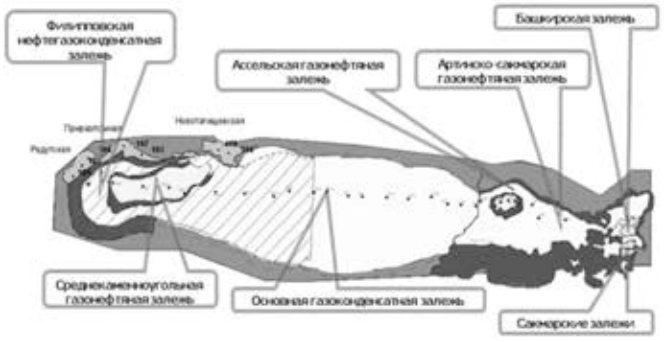


Рис. 6. **Схематическая карта Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения с основными залежами /**
Fig. 6. **Schematic map of the Orenburg oil and gas condensate field showing the main hydrocarbon accumulations**

Мощность осадочного чехла закономерно возрастает с запада на восток от 2–3 до 10–12 км, контролируясь погружением блоков фундамента. Границы блоков являются зонами длительной и многократной тектонической активизации, которые на протяжении всего фанерозоя определяли расположение основных структурных элементов осадочного чехла: валов, впадин, флектур. Это отчетливо проявляется в унаследованном характере Большекинельской валообразной зоны и Камелик-Чаганской зоны, приуроченных к областям сочленения крупных блоков фундамента.

Строение осадочного чехла и его структурно-вещественные комплексы

Осадочный чехол Южного Предуралья имеет трехчленное строение и включает подсолевой (рифей – нижняя пермь), межсолевой (кунгурский ярус) и надсолевой (верхняя пермь – кайнозой) комплексы, разделенные региональными флюидоупорами (соленосные толщи).

Подсолевой комплекс сложен терригенными (песчаники, алевролиты) и карбонатными (известняки, доломиты) породами. Основная нефтегазоносность связана с терригенными коллекторами франского яруса девона (пашийско-кыновские пласты) и карбонатными отложениями каменноугольной (турнейский, визейский, башкирский ярусы) и нижнепермской систем. Карбонатные коллекторы характеризуются высокой неоднородностью, обусловленной как первичными седиментационными обстановками (органогенные постройки), так и вторичными процессами – выщелачиванием, доломитизацией и тектонической трещиноватостью.

Межсолевой комплекс (кунгур) заключен между двумя толщами каменной соли, служащими идеальным флюидоупором. Сложен преимущественно карбонатными породами, в пределах которых формировались биогермные массивы. Локализация коллекторов межсолевого комплекса имеет строго структурно-обусловленный характер, контролируясь палеоподнятиями, унаследованными от блоковой структуры фундамента.

Надсолевой комплекс представлен терригенными породами (песчаники, алевролиты, глины) с подчиненными прослоями карбонатов и солей. Содержит в основном газовые и газоконденсатные залежи, приуроченные к пластовым и массивным ловушкам. Хотя коллекторы надсолевого комплекса характеризуются поровым типом пустотности, и здесь проявляется влияние разломно-блоковой тектоники: скрытые нарушения служат проводящими каналами для миграции флюидов и создают зоны локальной трещиноватости.

На рисунке 7 представлен сводный литолого-стратиграфический разрез района исследований, составленный по материалам параметрического бурения и сейсморазведки.

Роль новейшей и современной геодинамической активности

Анализ данных сейсмологического мониторинга за последние 10–15 лет позволил выявить четкую пространственную связь эпицентров землетрясений с зонами глубинных разломов. Более 70 % зарегистрированных событий имеют механизм очага сдвигового или взбросо-сдвигового типа и тяготеют к проекциям Токовского и Сакмаро-Илекского разломов (рис. 8). Это доказывает их современную активность.

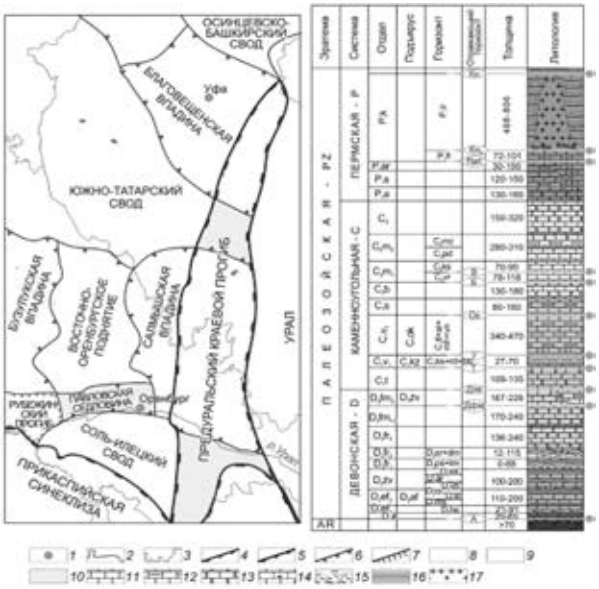


Рис. 7. **Обзорная карта и сводный литолого-стратиграфический разрез района исследований /**
Fig. 7. **Overview map and composite lithostratigraphic section of the study area**

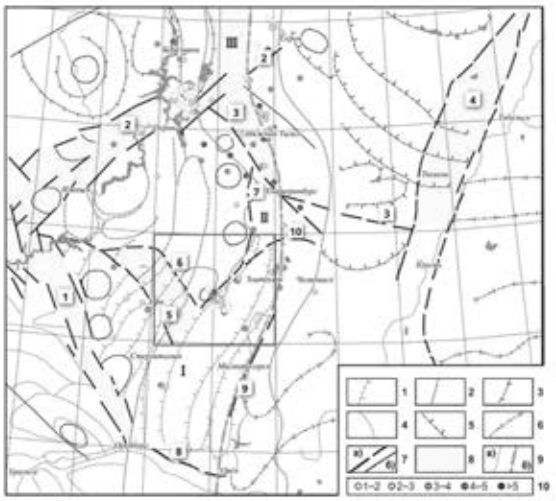


Рис. 8. **Современные геодинамические системы Южно-Уральского региона, включая смежные территории. Геодинамические системы: 1 – Уралтау-Магнитогорская; 2 – Осинско-Большеусинская; 3 – Верхнекамская; 4 – Циркум-Прикаспийская; 5 – Ханты-Мансийская (Среднеобская); 6 – Центрально-Азиатская (Памиро-Тянь-Шаньская); 7 – зоны нарушений: а – геодинамически активные зоны (ГдАЗ), б – линеаменты. ГдАЗ: Уржум-Оренбургская (Восточно-Каспийская) (1), Можга-Гремячинская (Ижевск-Пермско-Серовская) (2), Туро-Чусовская (3), Тобол-Иртышская (4), Камско-Среднеуральская (5), Бирско-Каратауская (6), Ардынская (7), Орская (8), Кыштымская (9) и Карабашская (10). 8 – зоны интерференции разнородных напряжений. 9 – горно-складчатое сооружение Урала: а – контур открытой части Южного (I), Среднего (II) и Северного Урала (III); б – Главный Уральский разлом. 10 – эпицентры землетрясений и их магнитуды. Территория детальных исследований (рис. 3) выделена серой рамкой /**
Fig. 8. **Present-day geodynamic systems of the Southern Ural region and adjacent territories. Geodynamic systems (GS): 1 – Uraltau-Magnitogorsk; 2 – Osinsk-Bolshaya Usa; 3 – Verkhnekamsk; 4 – Circum-Caspian; 5 – Khanty-Mansi (Middle Ob); 6 – Central Asian (Pamir–Tien Shan). 7 – fault zones: a – geodynamically active zones (GAZ), b – lineaments. GAZ: Urzhum-Orenburg (Eastern Caspian) (1), Mozhga-Gremyachinsk (Izhevsk-Perm-Serov) (2), Turo–Chusovskaya (3), Tobol–Irtysh (4), Kama–Middle Ural (5), Birsk-Karatau (6), Ardinskaya (7), Orsk (8), Kyshtym (9), and Karabash (10). 8 – zones of interference of heterogeneous stresses. 9 – the Ural fold-and-thrust belt: a – outline of the exposed parts of the Southern (I), Middle (II), and Northern Urals (III); b – Main Uralian Fault. 10 – earthquake epicentres and magnitudes. The detailed study area (Fig. 3) is outlined by a grey frame**

Данные спутниковой геодезии (GPS/GNSS) и радарной интерферометрии (InSAR) показали, что скорости современных движений земной коры в регионе достигают 2–4 мм/год. При этом векторы смещений разнонаправлены для соседних блоков, что указывает на их дифференцированный характер. Наиболее интенсивные поднятия (до 3–4 мм/год) фиксируются в пределах Большекинельского вала, что интерпретируется как свидетельство его современного роста.

Современная геодинамическая активность является прямым следствием реактивации унаследованных разломов фундамента. Этот процесс приводит к перераспределению напряжений в осадочном чехле и формированию (или обновлению) зон малоамплитудных нарушений и повышенной трещиноватости в приразломных зонах. Сейсмические события, даже малой магнитуды, играют роль триггерного механизма, поддерживая открытость трещин и обеспечивая вертикальную миграцию флюидов.

Влияние разломно-блоковой тектоники на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) и продуктивность

Наиболее значимые результаты получены при сопоставлении уточненной разломно-блоковой модели с данными разработки месторождений, в частности восточного участка Оренбургского НГКМ и структур Большекинельского вала.

Трещинные коллекторы: исследования керна из карбонатных отложений (визейский, башкирский ярусы, нижняя пермь) показали, что в приразломных зонах эффективная проницаемость на 2–3 порядка превышает фоновые значения матрицы за счет развития трещиноватости. На восточном участке Оренбургского НГКМ, где фоновые значения пористости в карбонатах визейского яруса не превышают 3–4 %, за счет интенсивной трещиноватости скважины показывают высокие и устойчивые дебиты.

Продуктивность скважин: анализ карт продуктивности и дебитов скважин показал их четкую приуроченность к линейным зонам, выделенным по сейсмическим атрибутам (когерентность, кривизна). На восточном участке Оренбургского НГКМ, схематически показанном на рисунке 6, около 85 % высокодебитных фонтанных скважин расположены в зонах влияния тектонических нарушений. Зоны улучшенных ФЕС часто смещены от сводов структур к их крыльям, где проходят разломы.

Миграционные пути: установлено, что современная сейсмическая активность играет роль «триггерного» механизма, поддерживая открытость трещин и обеспечивая вертикальную миграцию флюидов из нижних нефтегазоносных комплексов в вышележащие горизонты.

Этим объясняется вертикальная дифференциация углеводородов по нефтегазоносным комплексам: нефтяные залежи широко развиты в девонско-каменноугольных подсолевых коллекторах западных районов Оренбургской области и Большекинельской зоны, а газовые и газоконденсатные объекты приурочены к карбонатным и терригенно-карбонатным комплексам, включая Оренбургское НГКМ и смежные структуры [10]. Такое распределение не является универсальным правилом для всех участков региона, однако подтверждает необходимость учета вертикальной неоднородности разреза, региональных соленосных флюидоупоров и разломных путей миграции.

Модель геодинамического контроля нефтегазонакопления

На основе полученных данных предложена обобщающая модель, объясняющая закономерности размещения залежей УВ в регионе.

Модель включает следующие ключевые элементы:

Фундамент как «двигатель»: разломно-блоковая структура фундамента создает долгоживущий каркас и является источником напряжений.

Осадочный чехол как «отклик»: унаследованные структуры в чехле (валы, антиклинали) формируются за счет дифференцированных движений блоков.

Приразломная трещиноватость как «ключ»: в зонах влияния активных разломов формируются коллекторы с аномально высокими ФЕС, определяющие продуктивность ловушек.

Современная геодинамика как «регулятор»: современные подвижки и сейсмичность не только сохраняют проницаемость, но и могут вызывать перераспределение флюидов, что необходимо учитывать при разработке.

Интерпретация результатов и дискуссия

Полученные результаты развивают и дополняют идеи, высказанные ранее исследователями Предуральского прогиба [5, 6, 7, 10–15]. В отличие от традиционных представлений, где разломы рассматриваются либо как экраны, либо как пассивные структурные элементы, наше исследование доказывает их динамическую роль. Важно отметить, что не всякий разлом, а лишь разлом, находящийся в активной фазе развития (испытывающий подвижки в неотектонический этап), создает высокопроницаемую приразломную зону.

Выявленная связь между сейсмическими событиями и продуктивностью скважин открывает новые возможности для мониторинга разработки месторождений. Активизация сейсмичности вблизи зон отбора флюида может служить индикатором перестройки фильтрационных потоков, что согласуется с мировыми данными по индуцированной сейсмичности.

Практическая значимость работы заключается в возможности целенаправленного прогноза зон развития трещинных коллекторов, связанных с неотектонически активными разломами. Это позволяет перейти к поиску «слепых» залежей, не контролируемых четко выраженными структурными формами, и оптимизировать системы разработки за счет выбора наиболее перспективных участков для бурения и проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Заключение

1. Пространственное размещение зон нефтегазонакопления в Южном Предуралье подчинено разломно-блоковой тектонике фундамента. Наиболее продуктивные зоны Южного Предуралья, включая Большекинельскую и Камелик-Чаганскую зоны, приурочены к узлам сочленения глубинных разломов и длительно развивающимся унаследованным поднятиям.

2. Уточнена разломно-блоковая структура фундамента: выделены основные разломы (Токовский, Сакмаро-Илекский, субмеридиональные), определены их возраст, кинематика и роль в формировании осадочного чехла. Мощность осадочного чехла закономерно возрастает с запада на восток и контролируется блоковой тектоникой.

3. Доказана современная геодинамическая активность региона, выражающаяся в сейсмичности (M_w = 1,5–3,0) и

дифференцированных движениях земной коры (2–4 мм/год). Эпицентры землетрясений и зоны аномальных смещений совпадают с линиями глубинных разломов фундамента.

4. Установлено, что приразломные зоны трещиноватости, активизированные в новейшее время, играют ключевую роль в формировании высокопродуктивных коллекторов в низкопроницаемых карбонатных толщах. Продуктивность скважин на восточном участке Оренбургского НГКМ и других месторождениях коррелирует с близостью к активным разломам.

5. Показано влияние солевой тектоники на формирование и сохранность залежей углеводородов: соленосные толщи выполняют роль региональных флюидоупоров, участвуют в перераспределении напряжений, осложняют геометрию ловушек и могут усиливать блоковую неоднородность осадочного чехла. Поэтому при прогнозе нефтегазоносности необходимо совместно учитывать разломно-блоковый каркас и солетектонические процессы.

6. Предложена модель геодинамического контроля нефтегазонакопления, учитывающая унаследованный характер тектоники и современную активность разломов. Эта модель служит основой для повышения эффективности геологоразведочных работ и доразведки на зрелых месторождениях региона.

7. Разработанные методические подходы к интеграции геолого-геофизических данных и геодинамического мониторинга могут быть экстраполированы на другие платформенные нефтегазоносные регионы со сходным тектоническим строением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пичугин С.В., Котельникова Е.М., Усова В.М., Усов А.А. Результаты дистанционного анализа по поиску нового типа залежей нефти и газа в Оренбургской области. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023; 24 (2): 196-205. https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-196-205.
   Pichugin S.V., Kotelnikova E.M., Usova V.M., Usov A.A. Results of remote analysis to find a new type of oil and gas deposits in the Orenburg region. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023; 24 (2): 196-205. (In Russ.). https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-196-205.
2. Институт степи УрО РАН. Марьин Утес. Электронный ресурс. URL: https://orensteppe.org/node/3557. Дата обращения: 14.10.2026.
   Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Maryin Cliff. Electronic resource. URL: https://orensteppe.org/node/3557. Accessed: 14.10.2026. (In Russ.).
3. Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В. Концепция геодинамического мониторинга территорий нефтегазовых месторождений на примере Южного Предуралья. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2014; 4: 1-15.
   Nesterenko M.Yu., Tsvyak A.V. Concept of geodynamic monitoring of oil and gas field territories: a case study of the Southern Pre-Urals. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center, Ural Branch of RAS*. 2014; 4: 1-15. (In Russ.).
4. Федорова Н.В., Рублев А.Л. Численное моделирование источников магнитных аномалий в земной коре Южного Урала. *Геология и геофизика*. 2019; 60 (11): 1639-1649. https://doi.org/10.15372/GiG2019106.
   Fedorova N.V., Rublev A.L. Numerical modeling of the sources of magnetic anomalies in the South Urals Earth's crust. *Geologiya i Geofizika*. 2019; 60 (11): 1639-1649. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/GiG2019106.
5. Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Структурная геология юго-востока Восточно-Европейской платформы. Уфа: Гилем, 2001: 234.
   Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T. Structural geology of the southeastern East European Platform. Ufa: Gilem Publ., 2001: 234. (In Russ.).
6. Соборнов К.О. Строение Южного Урала и Предуралья на основе интерпретации региональных сейсмических данных и происхождение богатейших залежей нефти в Волго-Уральском бассейне. *Геология нефти и газа*. 2023; 1: 7-25. https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-1-7-25.
   Sobornov K.O. Structure of the Southern Urals and Pre-Urals based on regional seismic data interpretation and the origin of major oil accumulations in the Volga-Ural Basin. *Geology of Oil and Gas*. 2023; 1: 7-25. (In Russ.). https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-1-7-25.
7. Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Гафаров Н.А. и др. Ресурсный потенциал газовой части Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения на поздних стадиях разработки. *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2021; 3 (34): 35-48. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art3.
   Dmitrievsky A.N., Skibitskaya N.A., Gafarov N.A. et al. Resource potential of gas-saturated part of the Orenburg oil and gas condensate field at the final stages of development. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2021; 3 (34): 35-48. (In Russ.). https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art3.
8. Нестеренко М.Ю., Алёшин И.М., Гоев А.Г., Капустина О.А., Астакевич А.И. Оренбургская региональная сеть «Нефтегаз-сейсмика». *Сейсмические приборы*. 2023; 59 (2): 5-17. https://doi.org/10.21455/si2023.2-1.
   Nesterenko M.Yu., Aleshin I.M., Goev A.G., Kapustina O.A., Astakevich A.I. Orenburg regional network "Neftegaz-seismika". *Seismicheskie Pribory*. 2023; 59 (2): 5-17. (In Russ.). https://doi.org/10.21455/si2023.2-1.
9. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, 2000: 146.
   Puchkov V.N. Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Ufa, 2000: 146. (In Russ.).
10. Геологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области; под ред. Н. Ф. Козлова, А. С. Пантелеева. Оренбург: Оренбургское книжное издательство, 1997: 272.
    Geological structure and oil and gas potential of the Orenburg region; edited by N. F. Kozlov, A. S. Panteleev. Orenburg: Orenburg Book Publishing House, 1997; 272. (In Russ.).
11. Политыкина М.А., Тюрин А.М., Макаров С.Е. и др. Перспективы нефтегазоносности оренбургского сегмента передовых складок Урала. *Геология нефти и газа*. 2021; 6: 59-71. https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-6-59-71.
    Politykina M.A., Tyurin A.M., Makarov S.E. et al. Prospects of oil and gas potential in the Orenburg segment of the advanced folds of the Urals. *Geology of oil and gas.* 2021; 6: 59-71. (In Russ.). https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-6-59-71.
12. Керимов В.Ю., Кузнецов Н.Б., Мустаев Р.Н. и др. Условия формирования скоплений углеводородов во взбросонадвиговых структурах восточного борта Предуральского прогиба. *Нефтяное хозяйство*. 2017; 7: 36-41. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-36-41.
    Kerimov V.Yu., Kuznetsov N.B., Mustaev R.N., et al. Conditions for the formation of hydrocarbon accumulations in the thrust structures of the eastern side of the Preduralsky trough. *Oil Industry*. 2017; 7: 36-41. (In Russ.). https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-36-41.
13. Кузнецов Н.Б., Керимов В.Ю., Осипов А.В. и др. Эволюция, геодинамика поднадвиговых зон Предуральского краевого прогиба и геомеханическое моделирование формирования скоплений углеводородов. *Геотектоника*. 2018; 3: 3-20. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0016853X18030013.

Kuznetsov N.B., Kerimov V.Yu., Osipov A.V. et al. Evolution, geodynamics of thrust zones of the Pre-Ural marginal trough and geomechanical modeling of the formation of hydrocarbon accumulations. *Geotectonics.* 2018; 3: 3-20. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0016853X18030013.

14. Политыкина М.А., Тюрин А.М., Дроздов В.В. Верхнедевон-нижнепермский карбонатно-терригенный нефтегазоносный комплекс юга Предуральского прогиба, востока Прикаспийской впадины и зоны передовых складок Урала. *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2014; 79: 3-14.
Politykina M.A., Tyurin A.M., Drozdov V.V. Upper Devonian-Lower Permian carbonate-terrigenous oil and gas complex in the south of the Pre-Ural trough, east of the Caspian basin and the zone of advanced folds of the Urals. *The bowels of the Volga region and the Caspian Sea.* 2014; 79: 3-14. (In Russ.).
15. Силагина Т.В., Дроздов В.В., Тюрин А.М. и др. Литология и коллекторские свойства отложений ассельского яруса нижней перми зоны передовых складок Южного Урала по результатам бурения параметрической скважины 117 Предуральской. *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2012; 72: 12-19.
Silagina T.V., Drozdov V.V., Tyurin A.M., et al. Lithology and reservoir properties of sediments of the Asselian stage of the Lower Permian zone of advanced folds of the Southern Urals according to the results of drilling parametric well 117 Preduralskaya. *Subsoil of the Volga region and the Caspian Sea.* 2012; 72: 12-19. (In Russ.).
16. Matte Ph. Southern Uralides and Variscides: comparison of their anatomies and evolution. *Geologie en Mijnbouw.* 1995; 74: 151-166.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Вадимович Андреев –
аспирант, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация;
e-mail: makcimandreev147@gmail.com

Вадим Павлович Петрищев –
д-р геогр. наук, профессор кафедры геологии, географии и кадастра, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация

Галина Алексеевна Пономарева –
канд. геол.-минералог. наук, доцент кафедры геологии, географии и кадастра, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», г. Оренбург, Российская Федерация

Критерии авторства:
М. В. Андреев – формулировка концепции, цели и задач исследования; сбор, систематизация и интерпретация геологических, геофизических, геодинамических и промыслово-геологических материалов; анализ разломно-блоковой структуры кристаллического фундамента, строения осадочного чехла и пространственного размещения залежей углеводородов; разработка обобщенной модели геодинамического контроля нефтегазонакопления; визуализация результатов, подготовка первоначального текста и редактирование; В. П. Петрищев – научное руководство, методология исследования, проверка результатов и научное редактирование рукописи; Г. А. Пономарева – анализ геологических материалов, интерпретация данных, проверка результатов и редактирование рукописи. Все авторы прочитали и одобрили окончательную версию рукописи и несут ответственность за содержание работы.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 23.06.2026
Поступила после рецензирования: 20.09.2026
Принята к публикации: 08.10.2026

ABOUT THE AUTHORS

Maxim V. Andreev –
Postgraduate Student at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University named after V. A. Bondarenko", Orenburg, Russian Federation; e-mail: makcimandreev147@gmail.com

Vadim P. Petrishchev –
Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Department of Geology, Geography and Cadastre, Orenburg State University named after V. A. Bondarenko, Orenburg, Russian Federation

Galina A. Ponomareva –
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor of the Department of Geology, Geography and Cadastre, Orenburg State University named after V. A. Bondarenko, Orenburg, Russian Federation

Contribution:
M. V. Andreev – conceptualization, formulation of the aim and objectives, collection, systematization and interpretation of geological, geophysical, geodynamic and field-development data, analysis of the fault-block structure of the crystalline basement and sedimentary cover and the spatial distribution of hydrocarbon accumulations, development of a generalized model of geodynamic control on hydrocarbon accumulation, visualization, preparation of the original draft, and editing; V. P. Petrishchev – supervision, research methodology, validation of results, and scientific editing of the manuscript; G. A. Ponomareva – analysis of geological materials, data interpretation, validation of results, and manuscript editing. All authors read and approved the final version of the manuscript and are accountable for its content.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 23.06.2026
Revised: 20.09.2026
Accepted: 08.10.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 550.84:553.43:622.013
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-113-117

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 550.84:553.43:622.013

Композитная типизация геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы

И. О. Паничкин✉
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, г. Москва, Российская Федерация
✉ *ilja.pani4kin@yandex.ru*

Резюме. Предложен метод композитной типизации геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы, предназначенный для пространственного разделения рудного поля на высокопотенциальные, переходные и низкопотенциальные горно-геологические типы. Актуальность исследования связана с необходимостью учитывать при интерпретации не только содержание меди, но и форму локального геохимического поля, направленность его изменчивости, положение относительно рудного ядра и периферийных ореолов, а также литологический домен. Методика основана на комплексировании геохимических индексов, локальном квадратичном приближении поля, гессианном анализе и оценке линейной анизотропии. Проверка выполнена по фактическим содержаниям меди, геологическим доменам и двум независимым вариантам выделения кондиционных интервалов. Установлено, что типы 110 и 120 характеризуются долей длины с содержанием меди не ниже 0,30 % на уровне 75,2 %, а их средневзвешенные содержания составляют 0,706 и 0,698 %. Высокопотенциальная группа покрывает 43,1 % кондиционных интервалов по схеме Государственной комиссии по запасам Российской Федерации и 49,0 % интервалов по канадскому варианту. При включении переходных типов покрытие возрастает до 81,9 и 94,0 % соответственно. Научная новизна заключается в объединении геохимической выраженности, локальной геометрии поля и его анизотропии в едином интервальном показателе рудного потенциала. Практическая значимость состоит в возможности использования типизации для детализации рудного тела, выделения перспективных участков, обоснования доразведки и последующего планирования горных работ. Результаты исследований могут быть полезными при комплексной интерпретации данных опробования, пространственном районировании рудного поля, оценке его внутренней неоднородности и выборе участков, требующих дополнительной геологической детализации.

Ключевые слова: медно-порфировая система, трехмерное геохимическое поле, гессианный анализ, пространственная анизотропия, композитная типизация, содержание меди, геологические домены, кондиционные интервалы, рудный потенциал, планирование горных работ

Благодарность: Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату технических наук, доценту Георгию Ониковичу Абрамяну за научные консультации, обсуждение методических решений и рекомендации при подготовке статьи.

Для цитирования: Паничкин И.О. Композитная типизация геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 113-117. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-113-117.

Composite typing of geometric structures of a three-dimensional geochemical field in a porphyry copper system

I. O. Panichkin✉
National University of Science and Technology MISIS, Mining Institute, Moscow, Russian Federation
✉ *ilja.pani4kin@yandex.ru*

Abstract. This study proposes a method for composite typing of geometric structures within the three-dimensional geochemical field of a porphyry copper system. The method is intended to divide an ore field into high-potential, transitional and low-potential mining-geological types while accounting not only for copper grade but also for the local shape of the geochemical field, spatial anisotropy, position relative to the ore core and peripheral halos, and lithological domain. The workflow combines geochemical indices, local quadratic field approximation, Hessian analysis and an estimate of linear anisotropy into a composite interval-scale ore-potential indicator.

© Паничкин И. О., 2026

Validation was performed using measured copper grades, geological domains and two independent scenarios for defining mineralized intervals. Types 110 and 120 showed the most stable relationship with copper mineralization: 75.2 % of their interval length has copper grades not lower than 0.30 %, while their length-weighted grades are 0.706 % and 0.698 %, respectively. The high-potential group covers 43.1 % of mineralized intervals under the Russian State Commission on Mineral Reserves criterion scheme and 49.0 % under the Canadian-style scenario; inclusion of transitional types increases coverage to 81.9 % and 94.0 %. The novelty of the approach is the integration of geochemical intensity, local field geometry and anisotropy within a single interpretable classification framework. The method can support ore-body detailing, selection of prospective areas, planning of follow-up exploration, and subsequent mine planning while preserving geological interpretability at the interval scale. The research results may be useful for the integrated interpretation of sampling data, spatial zoning of the ore field, assessment of its internal heterogeneity, and selection of areas requiring additional geological detailing.

Keywords: porphyry copper system, three-dimensional geochemical field, Hessian analysis, spatial anisotropy, composite typing, copper grade, geological domains, mineralized intervals, ore potential, mine planning

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to his scientific supervisor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Georgy O. Abramyan, for scientific consultations, discussion of methodological approaches, and recommendations during the preparation of the article.

For citation: Panichkin I.O. Composite typing of geometric structures of a three-dimensional geochemical field in a porphyry copper system**.** *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 113-117. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-113-117.

Введение

При оценке медно-порфировых объектов важны не только содержания полезного компонента, но и пространственная организация минерализации. Рудное ядро, переходные и периферийные зоны различаются формой геохимического поля, направленностью изменчивости и связью с литолого-петрографическими доменами [1–3].

Для горного дела такая типизация позволяет разделять участки с различной степенью рудного потенциала, уточнять внутреннюю неоднородность рудного тела и обосновывать направления доразведки.

Цель работы: разработать и апробировать метод композитной типизации геометрических структур трехмерного геохимического поля и оценить его согласованность с содержанием меди, геологическими доменами и независимыми вариантами выделения кондиционных интервалов.

Материал и методика исследований

Исходные данные и система индексов

Исходные данные представлены интервалами кернового опробования. Для каждого интервала использованы координаты, глубины начала и окончания, мощность, содержание Cu и сопутствующих элементов, линия разреза и геологический домен. Набор признаков обеспечивает совместную оценку рудоносности, пространственной формы поля и геологической приуроченности выделенных типов [4–8]. Геохимические индексы и ранговые веса признаков приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Геохимические индексы и ранговые веса признаков / Geochemical indices and rank weights of indicators

Индекс	Геологическая роль	Вес
Core Index	Рудное ядро Cu – Mo – Ag	1,00
Periphery Index	Периферийная Zn – Pb – As – Sb ассоциация	0,90
Position Ratio	Соотношение ядра и периферии	0,80
Cu Ag ratio	Тип рудной ассоциации	0,70
Cu As ratio	Положение относительно As-ореола	0,60
Arsenic Halo	Мышьяково-сурьмяный ореол	0,50
Sulfide Index	Сульфидизация и пиритовая составляющая	0,50
Mafic Index	Литологический и петрогеохимический фон	0,25
Fe Mg ratio	Литологический модификатор	0,25

Весовая шкала таблицы 1 является экспертно-ранговой. Максимальный вес присвоен Core Index как прямому индикатору Cu – Mo – Ag минерализации; меньшие веса – периферийным и ореольным признакам, характеризующим положение интервала в системе. Литологические показатели используются как модификаторы геохимического поля, поэтому имеют минимальные веса.

Локальная форма поля и гессианный анализ

Для каждого индекса геохимическое поле рассматривается как дискретная функция трех координат.

Его локальная форма описывается квадратичной аппроксимацией в эллипсоидальной окрестности анализируемого интервала [9, 10]:

$$f(\Delta r) \approx a_0 + g^T \Delta r + \frac{1}{2} \Delta r^T H \Delta r, \quad (1)$$

где Δr – локальное смещение; g – градиент; H – гессиан поля.

Гессиан используется для определения локальной кривизны.

Вклад соседних проб задается эллипсоидальной весовой функцией; в расчетах приняты горизонтальный радиус – 100 м и вертикальный – 30 м, что соответствует вытянутой конфигурации скважинной сети.

$$H_f = (2a_4\ a_7\ a_8\ a_7\ 2a_5\ a_9\ a_8\ a_9\ 2a_6\ ). \quad (2)$$

Собственные значения гессиана характеризуют форму поля, а собственные векторы – направления максимальной и минимальной кривизны. Направление минимальной кривизны принято за ось локальной вытянутости.

Ее выраженность оценивалась коэффициентами линейной и плоскостной анизотропии:

$$C_l = \frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1|}, \quad C_p = \frac{|\lambda_2| - |\lambda_3|}{|\lambda_2|}, \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 и λ_3 – собственные значения гессиана, упорядоченные по убыванию абсолютной величины.

При сравнении использовались оси, противоположные направления считались эквивалентными.

Композитный рудный потенциал

Композитный рудный потенциал определяет положение интервала среди высокопотенциальных, переходных и низкопотенциальных типов и объединяет три нормированных вклада – структурный, анизотропный и геохимический [11–14]:

$$P_i = \min\left(1;\ S_i^w + A_i^w + B_i\right) \quad (4)$$

где P_i – композитный потенциал; S_i^w – структурный вклад локальной формы; $\bar{A}_i^w$ – вклад линейной анизотропии; B_i – геохимический вклад.

Высокие значения P_i соответствуют участкам, приоритетным для детализации рудного тела.

Результаты

Согласованность направлений геохимических структур

Осевое сравнение направлений минимальной кривизны приведено в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Осевое сравнение направлений минимальной кривизны / Axial comparison of minimum-curvature directions

Сопоставляемые признаки	Средний угол, град.	Доля углов менее 30°, %
Рудное ядро – периферия	23,3	68,3
Рудная ассоциация – ореол	23,1	69,0
Тип руды – положение относительно As-ореола	22,1	70,0

Средние углы между сопоставляемыми направлениями составляют 22,1–23,3°, а доля углов менее 30° – 68,3–70,0 %, что свидетельствует о согласованной пространственной организации рудных, периферийных и ореольных признаков.

Распределение композитных типов

Распределение композитных типов приведено в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Распределение композитных типов / Distribution of composite types

Тип	Количество интервалов	Доля, %	Горно-геологическая интерпретация
100	3 668	8,3	Высокий потенциал неопределенного типа
110	2 748	6,2	Высокопотенциальная рудная фаза ядра
120	7 175	16,1	Высокопотенциальная рудно-переходная фаза
210	2 738	6,2	Переходная периферийная фаза
220	14 483	32,6	Переходная периферийно-ореольная фаза
230	7 448	16,8	Структурно-анизотропная поисковая фаза
240	8	0	Слабоконтрастная переходная фаза
300	6 179	13,9	Низкопотенциальная фаза

Наиболее распространен тип 220 (14 483 интервала; 32,6 %), отражающий периферийно-ореольную переходную зону. Высокопотенциальные типы 100, 110 и 120 суммарно составляют 30,6 % выборки, низкопотенциальный тип 300 – 13,9 %.

Связь композитной типизации с фактическим содержанием Cu

Среднее и медианное содержание Cu по композитным типам и доля длины с Cu не ниже 0,30 % представлены на рисунках 1 и 2.

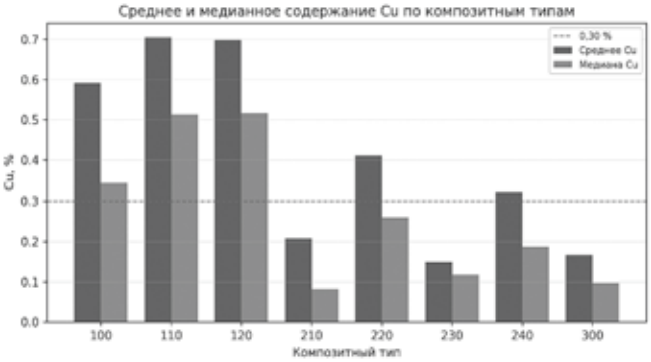


Рис. 1. **Среднее и медианное содержание Cu по композитным типам / *Fig. 1.* Mean and median copper content by composite type**

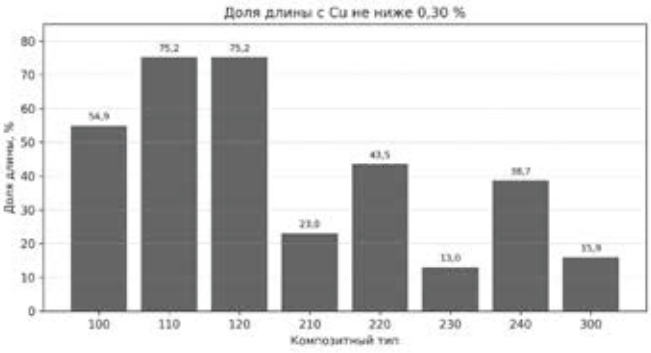


Рис. 2. **Доля длины с Cu не ниже 0,30 % / *Fig. 2.* Share of length with Cu not lower than 0.30 %**

По содержанию Cu наиболее устойчиво выделяются типы 110 и 120: средневзвешенные содержания равны 0,706 и 0,698 %, медианные – 0,513 и 0,517 %, а доля длины с Cu не ниже 0,30 % составляет 75,2 % для обоих типов. Для типа 100 этот показатель равен 54,9 %.

Переходные типы демонстрируют закономерное снижение рудоносности: для типа 210 средневзвешенное Cu составляет 0,194 %, а доля длины выше 0,30 % – 23,0 %; для типа 220 – 0,399 и 43,5 % соответственно. Типы 230 и 300 характеризуются более низкими значениями Cu.

Связь с геологическими доменами

Структура геологических доменов по композитным типам представлена на рисунке 3.

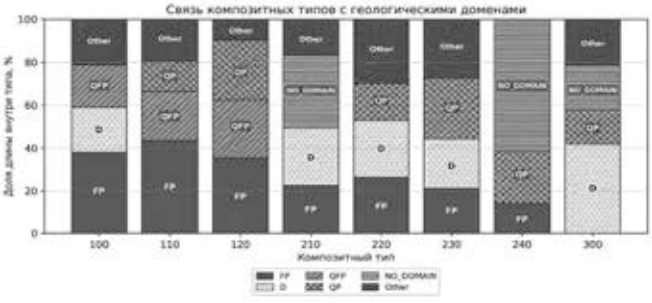


Рис. 3. **Структура геологических доменов по композитным типам / *Fig. 3.* Geological-domain structure by composite type**

Высокопотенциальные типы 100, 110 и 120 преимущественно связаны с доменом FP, доля которого составляет 37,6, 43,2 и 34,6 % соответственно. Домен QFP входит в число ведущих только в высокопотенциальной группе; для типа 120 суммарная доля QFP и QP достигает 54,6 %, что соответствует его рудно-переходной природе.

Тип 220 связан преимущественно с D, FP и QP, тип 230 имеет максимум в QP, а тип 300 характеризуется доминированием D и повышенной долей неуточненных доменов. Распределение доменов согласуется с принятой горно-геологической интерпретацией типов.

Сравнение композитной типизации с вариантами выделения кондиций по Государственной комиссии по запасам Российской Федерации и канадской системе

По кондиционной схеме ГКЗ выделено 2 074 интервала, по канадскому варианту – 1 724; композитная типизация сформировала 14 918 интервалов, обеспечивая более детальное пространственное разбиение рудного поля.

Подтверждение типов независимыми интервальными сценариями представлено на рисунке 4.

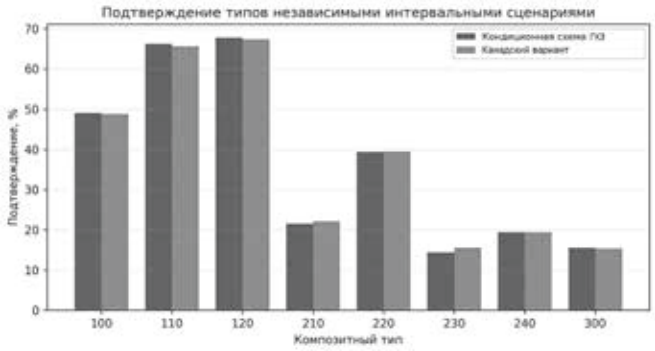


Рис. 4. **Подтверждение типов независимыми интервальными сценариями /**
Fig. 4. **Confirmation of types by independent interval scenarios**

Наибольшее подтверждение имеют типы 110 и 120: по схеме ГКЗ – 66,2 и 67,8 %, по канадскому варианту – 65,6 и 67,4 %. Тип 120 также обеспечивает наибольшее среди высокопотенциальных типов покрытие опорных интервалов – 24,7 и 28,1 % соответственно.

Тип 220 имеет умеренное подтверждение, но значительное покрытие – 30,1 % интервалов по схеме ГКЗ и 34,5 % – по канадскому варианту, что подтверждает прикладную роль переходных периферийно-ореольных зон.

Обсуждение

Композитная типизация формирует горно-геологически интерпретируемую систему типов рудного поля. Высокопотенциальные типы 110 и 120 одновременно подтверждаются содержанием Cu, кондиционными интервалами и связью с доменом FP; присутствие QFP преимущественно в этой группе усиливает геологическое обоснование выделенных рудных фаз. Тип 100 характеризует участки с высокой геометрической выраженностью поля, но менее специализированной геохимической природой.

Переходные типы имеют самостоятельное значение: тип 220 отражает периферийно-ореольную зону и обеспечивает существенное покрытие опорных интервалов, а тип 230 выделяет структурно-анизотропные участки, потенциально связанные с контактами и каналами флюидопереноса. Таким образом, метод дополняет кондиционную интерпретацию пространственной информацией и может использоваться при выборе участков детализации и доразведки. Совместное использование геохимических и пространственных признаков соответствует современному направлению выявления многомерных геохимических аномалий [15].

Для планирования горных работ высокопотенциальные типы целесообразно использовать при выборе участков первоочередной детализации и доразведки, переходные – для уточнения границ и оценки риска разубоживания, низкопотенциальные – для предварительного ограничения менее перспективных участков.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Результаты зависят от плотности и конфигурации опробования, качества пространственной привязки, размеров локальной окрестности и экспертных весов; поэтому параметры требуют повторной калибровки для других объектов. Метод является инструментом поддержки интерпретации и не заменяет процедуры установления кондиций и подсчета запасов. Дальнейшие исследования должны включать анализ чувствительности к разрежению сети, автоматизированный подбор весов и проверку устойчивости типизации на независимых месторождениях.

Заключение

1. Предложенная композитная типизация объединяет локальную форму геохимического поля, анизотропию и геохимические индексы, дополняя кондиционную интерпретацию пространственными характеристиками.

2. Наиболее устойчивые результаты получены для типов 110 и 120: средневзвешенные содержания Cu составляют 0,706 и 0,698 %, а доля длины с Cu не ниже 0,30 % – 75,2 % для обоих типов.

3. Типы 110 и 120 подтверждаются независимыми кондиционными интервалами и геологическими доменами. Высокопотенциальная группа 100/110/120 покрывает 43,1 % интервалов по схеме ГКЗ и 49,0 % по канадскому варианту; с учетом переходных типов – 81,9 и 94,0 %.

4. Практическое значение метода состоит в выделении участков для детализации и доразведки, уточнении переходных границ и более обоснованном планировании последующих горных работ.

5. Результаты исследований могут быть полезными при комплексной интерпретации данных опробования, пространственном районировании рудного поля, оценке его внутренней неоднородности и выделении участков, требующих дополнительного геологического изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*. 1970; 65 (4): 373-408. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373.
2. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 2010; 105 (1): 3-41. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3.
3. Викентьев И.В., Шатов В.В., Смирнов Д.И. и др. Медно-золотопорфировое месторождение Юбилейное (Западный Казахстан): геологическая позиция и условия образования. *Геология рудных месторождений*. 2023; 65 (7). https://doi.org/10.31857/S0016777023070080.
   Vikentiev I.V., Shatov V.V., Smirnov D.I., et al. The Yubileinoe Cu–Au Porphyry Deposit (Western Kazakhstan): Geological Setting and Formation Conditions. *Geology of Ore Deposits.* 2023; 65 (7). (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0016777023070080.
4. Cheng Q., Agterberg F.P., Ballantyne S.B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*. 1994; 51 (2): 109-130. https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2.
5. Zuo R., Xia Q., Wang H. Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization. *Applied Geochemistry*. 2013; 28: 202-211. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.031.
6. Zhang S., Carranza E.J.M., Fu C., et al. Interpretable machine learning for geochemical anomaly delineation in the Yuanbo Nang District, Gansu Province, China. *Minerals*. 2024; 14 (5): 500. https://doi.org/10.3390/min14050500.
7. Min Y., Zhao J., Sui Y., et al. Comparison of manifold learning algorithms for identifying geochemical anomalies associated with copper mineralization. *Scientific Reports*. 2025; 15: 39628. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23301-7.
8. Nathwani C.L., Wilkinson J.J., Fry G., et al. Machine learning for geochemical exploration: classifying metallogenic fertility in arc magmas and insights into porphyry copper deposit formation. *Mineralium Deposita*. 2022; 57: 1143-1166. https://doi.org/10.1007/s00126-021-01086-9.
9. Frangi A.F., Niessen W.J., Vincken K.L., et al. Multiscale vessel enhancement filtering. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI'98. Lecture Notes in Computer Science*. 1998; 1496: 130-137. https://doi.org/10.1007/BFb0056195.
10. Bolsinov A.V., Konyaev A.Yu., Matveev V.S. Nijenhuis geometry. *Advances in Mathematics*. 2022; 394: 108001. https://doi.org/10.1016/j.aim.2021.108001.
11. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. 2020; 3: 29-37. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
    Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Assessment of mineral quality indicators using geoinformation technologies for block modeling. *Geoinformatika.* 2020; 3: 29-37. (In Russ.). https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
12. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021; 1: 63-73. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.
    Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Application of geoinformation block modeling technologies to improve methods for assessing mineral quality indicators. News of the Higher Institutions. *Mining Journal.* 2021; 1: 63-73. (In Russ.). https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.
13. Мельниченко И.А., Кожухов А.А., Омельченко Д.Р. и др. Построение трехмерной модели месторождения с использованием принципов блочного моделирования и искусственных нейронных сетей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 10: 5-19. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_5.
    Melnichenko I.A., Kozhukhov A.A., Omelchenko D.R., et al. Construction of a 3D deposit model using block modeling principles and artificial neural networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2022; 10: 5-19. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_5.
14. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Тимохин А.В. и др. Совершенствование методов учета повышенных потерь и разубоживания полезного ископаемого при добыче. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 3-1: 453-464. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-453-464.
    Kantemirov V.D., Titov R.S., Timokhin A.V., et al. Improving methods for accounting for increased mineral losses and dilution during extraction. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2020; 3-1: 453-464. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-453-464.
15. Mou N., Wang G., Sun X. Identification of geochemical anomalies related to mineralization: a case study from porphyry copper deposits in the Qulong-Jiama mining district of Tibet, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2023; 244: 107126. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107126.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Илья Олегович Паничкин –
аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 24.09.2026
Поступила после рецензирования: 29.09.2026
Принята к публикации: 12.10.2026

ABOUT THE AUTHOR

Ilia O. Panichkin *–*
Postgraduate Student, Department of Geology and Mine Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation;
e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru

Article info
Received: 24.09.2026
Revised: 29.09.2026
Accepted: 12.10.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.235
https://doi.org/ 10.56195/20793332-2026-26-5-118-124

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.235

Увеличение ширины блока в приконтурной зоне карьера при помощи разгрузочных пауз с сохранением безопасного уровня сейсмики

И. О. Ковальчук✉, А. А. Добрынин, Р. А. Рахманов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ *io@kovalchuck.ru*

Резюме. Представлены результаты измерения сейсмического воздействия от массового взрыва в приконтурной зоне карьера, в том числе анализ влияния ширины взрываемого участка блока на амплитуду скорости смещения частиц породы. Выполнена оценка потери производительности экскавации в зависимости от ширины взрываемых блоков и представлены мероприятия, которые в целом способствуют повышению устойчивости бортов карьера и увеличению производительности выемочно-погрузочной техники. В основе статьи – технологии применения разгрузочных пауз совместно с электронной системой инициирования. Рассмотрен вариант совмещения электронной и неэлектрической систем инициирования. Отмечена важность высококвалифицированного сопровождения при внедрении электронных систем инициирования с учетом геолого-структурных особенностей горного массива. Результаты исследований могут быть полезными при подготовке горной массы к выемке буровзрывным способом в условиях глубоких карьеров, в том числе там, где вопросы сейсмической безопасности являются приоритетными.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, законтурное разрушение, скорость смещения частиц породы, геолого-структурные особенности, сейсмодатчики, внутрискважинные геофоны, регрессионный анализ, производительность экскавации, устойчивость бортов карьера, электронные системы инициирования, разгрузочные паузы

Для цитирования: Ковальчук И.О., Добрынин А.А., Рахманов Р.А. Увеличение ширины блока в приконтурной зоне карьера при помощи разгрузочных пауз с сохранением безопасного уровня сейсмики. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 118-124. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-118-124.

Increasing of a blasted block width in the open pit final-wall zone by using relief pauses with keeping safety vibration

I. O. Kovalchuk✉, A. A. Dobrynin, R. A. Rakhmanov
Institute of comprehensive exploration of mineral resources Russian academy of sciences, Moscow, Russian Federation
✉ *io@kovalchuck.ru*

Abstract. This paper presents the results of measurements of blast-induced ground vibration from a production blast in the final-wall zone of an open pit, including an analysis of the effect of the blasted block width on the amplitude of peak particle velocity in the rock mass. The paper also evaluates the loss of excavation productivity as a function of the width of blasted blocks and proposes measures that generally contribute to improving pit slope stability and increasing the productivity of loading and hauling equipment. The paper is based on a description of a blasting technique involving the use of relief pauses in combination with an electronic initiation system. A combined application of electronic and non-electric initiation systems is also considered. In addition, the paper emphasizes the importance of highly qualified technical support during the implementation of electronic initiation systems, taking into account the geological and structural conditions of the rock mass. Research results can be useful to prepare for excavation rock mass by drilling and blasting method in the conditions of deep open pits where issues of seismic safety are priority.

Keywords: ground vibration, overbreak, peak particle velocity, geological and structural conditions, vibration sensors, in-hole geophone, regression analysis, excavation and loading equipment productivity, pit slope stability, electronic blasting system, relief pauses

For citation: Kovalchuk I.O., Dobrynin A.A., Rakhmanov R.A. Increasing of a blasted block width in the open pit final-wall zone by using relief pauses with keeping safety vibration. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 118-124. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-118-124.

© Ковальчук И. О., Добрынин А. А., Рахманов Р. А., 2026

Введение

Электронные системы инициирования (ЭСИ) набирают все большую популярность в Российской Федерации при подготовке горных пород к выемке буровзрывным способом.

Основные отличительные особенности электронной системы инициирования от неэлектрической системы инициирования (НСИ):

– *безопасность.* В поверхностной взрывной сети (ВС) отсутствуют взрывчатые материалы, имеется возможность проверить работоспособность каждого электронного детонатора до подачи команды на взрыв;

– *вариативность времени замедления*. Возможность проектировать разнообразные схемы монтажа ВС, в том числе с разными направлениями и темпами отбойки (времени распространения инициирующего импульса в 1 м массива горных пород);

– *точность времени замедления*. Возможность снижать сейсмическое воздействие от взрыва, улучшать грансостав, эффективно применять рассредоточенные заряды взрывчатых веществ (ВВ), гарантировать проектную последовательность инициирования скважинных зарядов ВВ.

На многих зарубежных и отечественных карьерах ЭСИ успешно применяют именно в приконтурной зоне с целью снижения степени нарушенности законтурного массива при постановке уступов в конечное или долгосрочное положение. Частичный переход с НСИ на ЭСИ обусловливается дороговизной электронных детонаторов.

На сегодняшний день ЭСИ китайских брендов примерно в 1,5–5 раз дороже по сравнению с НСИ. Стоимость зависит от логистики и количества электронных детонаторов в одной партии поставки. Однако еще 10 лет назад стоимость ЭСИ была примерно на порядок дороже, чем НСИ. Поэтому применение ЭСИ становится все более целесообразным, в том числе с экономической точки зрения.

На глубоких карьерах из-за геолого-структурных особенностей месторождений отработка в приконтурной зоне требует особого внимания и применения различных методов щадящего взрывания [1–3]. Зачастую производительность выемочно-погрузочной техники снижается, если ширина и высота развала взорванной горной массы не соответствует оптимальным параметрам. Переход на узкие прибортовые блоки в приконтурной зоне карьера связан с необходимостью снижения сейсмического воздействия на борт, что способствует повышению его устойчивости.

Оценкой сейсмического действия взрыва занимались многие специалисты [4–15]. В основе их исследований лежит анализ амплитудно-частотной характеристики сейсмовзрывных волн, измеренной с помощью сейсмодатчиков в момент проведения массового взрыва.

При должном инженерном сопровождении с помощью применения ЭСИ в приконтурной зоне карьера можно добиться увеличения ширины прибортовых блоков с сохранением безопасного уровня сейсмического воздействия в сторону законтурного массива и требуемого качества к взорванной горной массе, что в свою очередь позволит значительно повысить производительность выемочно-погрузочной техники и оптимизировать затраты на буровзрывные работы (БВР).

Цель исследований: апробация в производственных условиях глубокого карьера технологии ведения взрывных работ, включающей создание разгрузочных пауз с применением ЭСИ.

Методы проведения исследований

На карьере по добыче рудного золота, где вопросы устойчивости откосов уступов являются весьма актуальными, были выполнены измерения сейсмического воздействия с помощью внутрискважинных и поверхностных геофонов, а также с применением ЭСИ Hitronic. В основе измерений лежало сравнение пиковых скоростей смещения частиц горной породы (PPV– peak particle velocity) и выявление зависимости от ширины взрываемого участка блока в приконтурной зоне. Поскольку применяли ЭСИ, была возможность поделить блок на отдельные участки с разной шириной и взорвать их все за один массовый взрыв, не опасаясь подбоя поверхностной и внутрискважинной сети. Данные для анализа получали в результате измерений внутрискважинным геофоном, так как его применение позволяет объективно оценить амплитудно-частотную характеристику сейсмических волн в целике, исключив преломления, которые происходят в подошвенном слое уступа, нарушенного взрывом вышележащего блока.

В качестве внутрискважинного геофона (рис. 1) использовали сейсмодатчик чилийского производства, характеристики которого представлены в таблице 1.



Рис. 1. **Внешний вид внутрискважинного геофона /**
Fig. 1. **In-hole geophone view**

Таблица 1 / Table 1

Технические характеристики внутрискважинного геофона / Technical parameters in-hole geophone

Характеристика	Параметр, описание
Модель	Minimate Pro, трехкомпонентный геофон для измерения ближней зоны взрыва, подключается к сейсморегистратору Instantel Minimate Pro через специальную соединительную коробку
PPV_{max}	2 543 мм/с
АЧХ	28 Гц
Сопротивление	162,1 ± 8 % Ом/м
Чувствительность	0,0012674 В/мм/с
Длина кабеля	15 м
Дата производства	25.11.2024

В процессе измерения использовали два внутрискважинных геофона, которые устанавливали в скважины диаметром 152 мм на глубину 5,5 м, затем заливали их раствором бетона для обеспечения прочной связи со стенками скважины, то есть с ненарушенным массивом горных пород (рис. 2). При этом средняя высота уступа взрываемого блока горных пород составляла 7,5 м.

Результаты исследований

Последовательность взрывания участков была следующей: между участками 1 и 2 сделали паузу продолжительностью 1 с. Затем, после инициирования скважинных зарядов ВВ на участке 2, через 100 мс инициировали заряды на участке 3 и, далее, через 1 с инициировали заряды на участке 4, а затем на участке 5. Таким образом, изначальная ширина блока, составляющая 47 м, была разделена на две части: 28,5 и 18,5 м, при этом выдержан равномерный темп отбойки 20 мс/м на всех участках.

Процесс взрыва всего блока был зарегистрирован как внутрискважинными, так и поверхностными геофонами. Следует отметить, что значения PPV поверхностных геофонов оказались выше значений внутрискважинных (табл. 2) несмотря на то, что расстояние от ближайшей взрываемой скважины до внутрискважинного геофона было меньше. В качестве поверхностных геофонов применялись канадские сейсмодатчики от компании Instantel типа ISEE 2-250 Гц, более подробно с техническими характеристиками можно ознакомиться на сайте производителя [16].

Таблица 2 / Table 2

Сравнение PPV поверхностного и внутрискважинного геофонов / PPV comparing of a surface and in-hole geophones

Тип геофона	№ геофона	Ближайшее расстояние от геофона до взрываемой скважины, м	PPV, мм/с	Доминирующая частота, Гц
Поверхностный	V_3	20	165,4	24
Поверхностный	V_3	20,7	150,5	32
Внутрискважинный	V_1	17,7	144,5	36
Внутрискважинный	V_2	17,5	99,9	36

Сравнительный анализ сейсмического воздействия от разных участков блока по полученным в эксперименте сейсмоданным от внутрискважинных геофонов был выполнен по модели приведенного расстояния [17–19] как

$$PVS = K * \left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-\alpha},$$

где PVS – суммарный вектор максимальной скорости смещения грунта, мм/с;

K – коэффициент сейсмичности;

R – ближайшее расстояние до скважинных зарядов ВВ, м;

Q – масса ВВ в скважинных зарядах, взрываемых в определенную ступень замедления, кг;

α – показатель степени затухания.

Отношение $\frac{R}{\sqrt{Q}}$ называется приведенным расстоянием (SD), для расчета которого учитывается общая масса ВВ в скважинах, взрываемых в окно времени 1 мс, и ближайшее расстояние от блока до геофона.

Внутрискважинные геофоны V_1 и V_2 подключались к сейсморегистратору Instantel Minimate Pro 6, из которого после взрыва были извлечены сейсмограммы, отражающие PPV на каждом участке (рис. 3).

Одним из традиционных подходов в мировой практике ведения горных работ в приконтурной зоне карьера является отработка узких прибортовых блоков отдельным массовым взрывом [20]. Ширина таких блоков, как правило, соответствует безопасной ширине охранного целика, которая в данном карьере имеет значение 20 м. Таким образом, выемочно-погрузочная техника зачастую вынуждена работать в забоях с недостаточной шириной заходки, где может снижаться ее производительность.

Для уточнения этой гипотезы была проанализирована производительность экскаватора ЭКГ-20 на протяжении двух горизонтов. В качестве критерия для анализа была взята средняя производительность экскаватора при ширине блоков до 30 м и при ширине блоков 30 м и более. Очевидно, что при увеличении ширины взрываемого блока появляется возможность сократить количество взрывных дней (смен), поэтому в качестве дополнительного критерия для анализа произво-

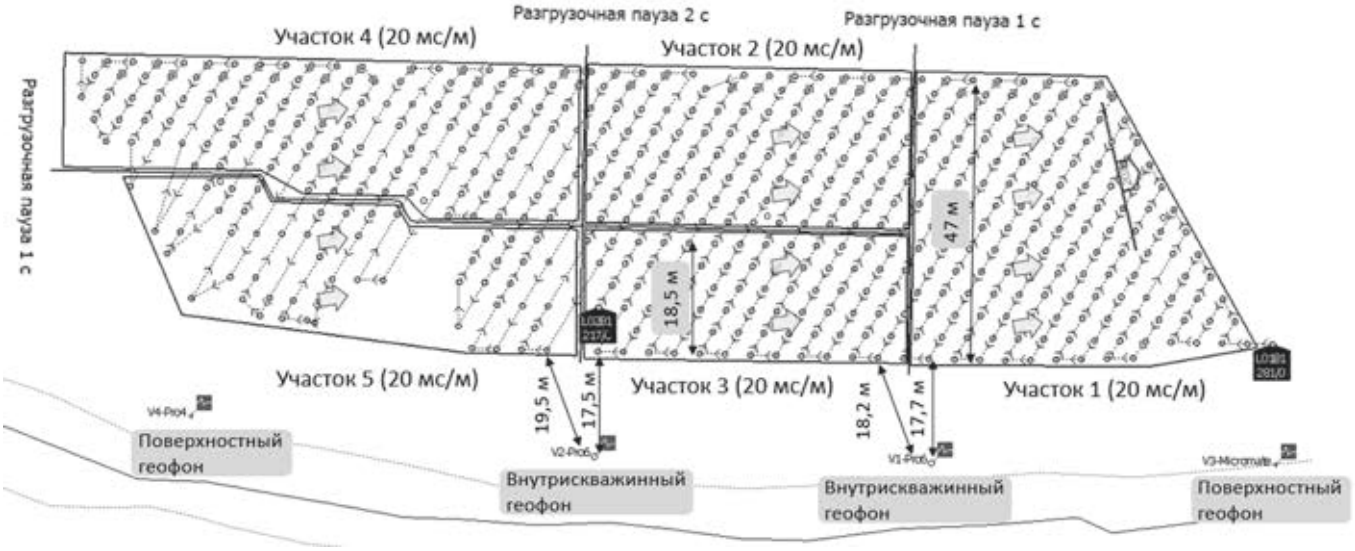


Рис. 2. **Схема установки геофонов и расположения взрывных скважин /** ***Fig. 2.*** **Scheme of installing geophones and blast holes design**

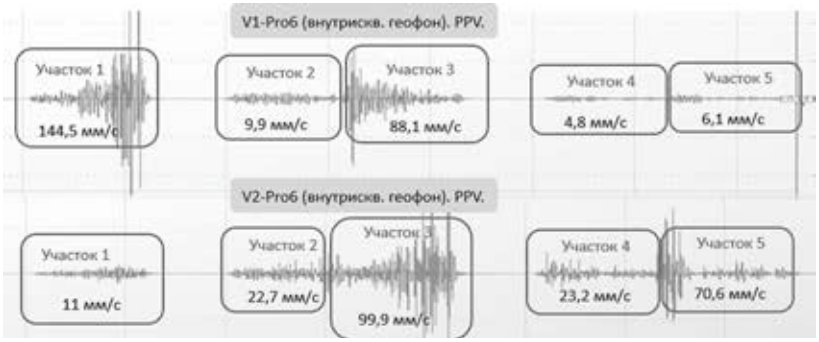


Рис. 3. **Сейсмограммы от внутрискважинных геофонов /** ***Fig. 3.*** **In-hole geophones seismograms**

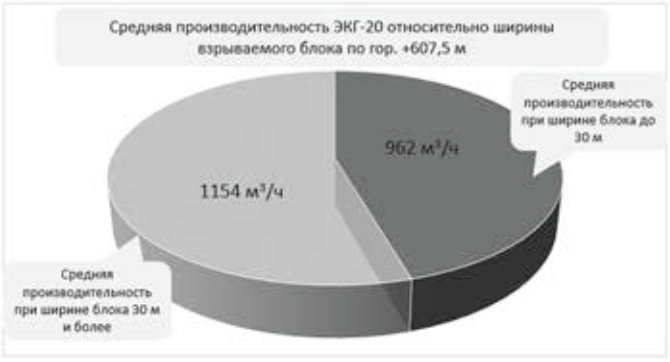
дительности было учтено время простоя экскаваторов ЭКГ-20 в среднем в течение суток в зависимости от наличия или отсутствия массового взрыва за период продолжительностью восемь месяцев.

Обсуждение результатов

Анализ производительности экскавации представлен на рисунках 4 и 5. Относительно влияния узких блоков на производительность было определено, что на горизонте +607,5 м потеря производительности экскаватора ЭКГ-20 составила 16,7 %, а на горизонте +600 м – 10,4 %. Что касается расчета простоев экскаваторов из-за проведения массовых взрывов, то сокращение количества взрывных дней способствует увеличению коэффициента использования оборудования (КИО) на 0,21 % за один день. Дополнительно к положительному эффекту можно отнести отсутствие износа ходовой части вследствие перегона экскаватора на безопасное расстояние 250–300 м в одну сторону, а также объем отгрузки взорванной горной массы 7,7 тыс. м^3 с одного экскаватора ЭКГ-20.

	Средняя производительность при ширине блока до 30 м	Средняя производительность при ширине блока 30 м и более	Потеря производительности на узких блоках
	962	1154	**16.7%**
Ср. уд. расход ВВ, кг/м^3	0.63	0.67	
Количество блоков	15	18	

	Средняя производительность при ширине блока до 30 м	Средняя производительность при ширине блока 30 м и более	Потеря производительности на узких блоках
	914	1020	**10.4%**
Ср. уд. расход ВВ, кг/м^3	0.72	0.68	
Количество блоков	16	16	



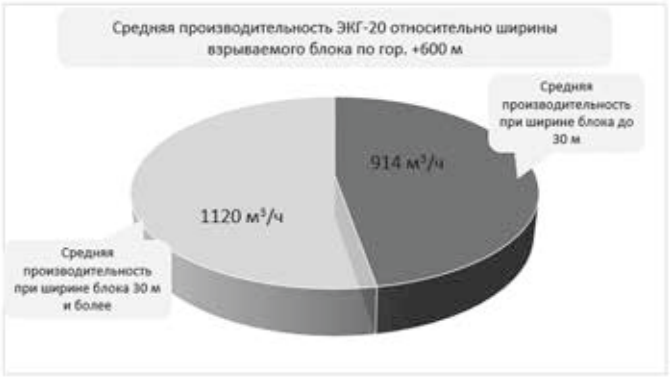


Рис. 4. **Потери производительности экскаваторов ЭКГ-20 из-за узких взрываемых блоков /**
Fig. 4. **Loss of ЭКГ-20 excavator productivity due to narrow blasted blocks**

	Кол-во дней	Часы простоя в среднем в сутки	Сумма часов простоев	Общая сумма часов по простоям	Общая сумма часов	КИО	Если уменьшить кол-во взрывных дней на	Кол-во дней	Часы простоя в среднем в сутки	Сумма часов простоев	Общая сумма часов по простоям	КИО	Увеличение КИО
ИТОГО без взрывных дней	114	7.0	800.6				1	115	7.0	807.6			
ИТОГО в взрывные дни	129	13.7	1773.0	2573.6	5832.0	0.56		128	13.7	1759.3	2566.9	0.56	**0.21%**

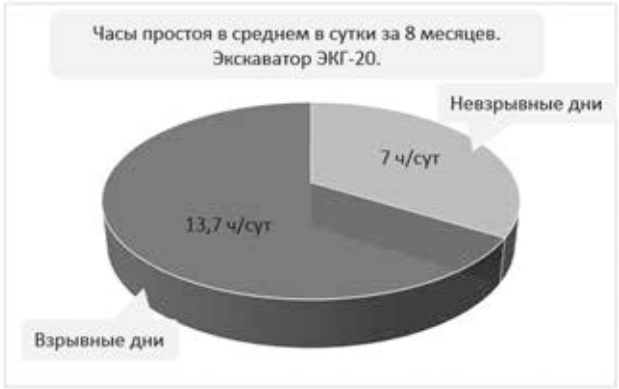


Рис. 5. **Простои экскаваторов ЭКГ-20 из-за массовых взрывов /** ***Fig. 5.*** **ЭКГ-20 excavator downtime caused by production blasting**



К (полная ширина блока)	α (полная ширина блока)	К (с учетом разгрузочной паузы)	α (с учетом разгрузочной паузы)	% снижения
595	-2,17	362	-2,17	39%

	% снижения	PPV (полная ширина блока), мм/с	PPV (учетом разгрузочной паузы), мм/с	Расстояние до борта, м	Масса ВВ на ступень замедления, кг	К (полная ширина блока)	α (полная ширина блока)	К (с учетом разгрузочной паузы)	α (с учетом разгрузочной паузы)
	-66%	193,8	116,4	15	80	595	-2,17	328,36	-2,006
	-59%	103,8	65,4	20					
	-53%	63,9	41,8	25					
	-49%	43,1	29,0	30					
	-45%	30,8	21,3	35					
	-42%	23,1	16,3	40					
	-39%	17,9	12,8	45					
	-37%	14,2	10,4	50					
	-35%	11,6	8,6	55					
	-33%	9,6	7,2	60					
	-31%	8,0	6,1	65					
	-29%	6,8	5,3	70					
Ср. значение	-43%								

Рис. 6. **Результат регрессионного анализа сейсмоданных /** ***Fig. 6.*** **Regression analysis results of vibration data**

Результат сейсмического воздействия на законтурный массив, обработанный по модели приведенного расстояния и с помощью регрессионного анализа, представлен на рисунке 6. На графике четко видно, что воздействие от участка 1, взрываемого на полную ширину, значительно выше, чем от остального блока, поделенного на участки с помощью разгрузочных пауз.

Сравнительный анализ по оценке снижения сейсмического воздействия был выполнен двумя способами:

1. Построением параллельной проекции степенной линии тренда относительно сейсмоданных, полученных от участка 1, так как приведенное расстояние SD и скорость смещения породы PPV от участка 3, полученные от внутрискважинных геофонов V_1 и V_3, имели близкие друг к другу значения;

2. Построением степенной линии тренда по четырем точкам, полученным внутрискважинными геофонами V_1 и V_2 от участков 3 и 5.

В первом способе сравнивали только значения коэффициента сейсмичности *K*, так как показатель степени затухания α был одинаковый, а во втором способе оценивали средний процент снижения интенсивности сейсмической волны на расстоянии от 15 до 70 м до борта.

Таким образом были получены конкретные значения по снижению сейсмического воздействия на борт при условии применения ЭСИ и разгрузочных пауз, которые составили 39 и 43 %. Стоит отметить, что конкретные значения по снижению сейсмического воздействия (точность измерений) зависят от условий выполнения измерений, а именно от количества используемых внутрискважинных геофонов и геологических характеристик исследуемого участка массива.

В заключение отметим, что технология разгрузочных пауз применяется как с ЭСИ, так и в комбинации ЭСИ и НСИ (рис. 7). Подход с комбинированием ЭСИ и НСИ позволяет снизить общую трудоемкость производства взрывных работ на первых этапах, до тех пор, пока персонал взрывного участка не приобретет соответствующие навыки работы с электронными детонаторами.



Рис. 7. **Схема отработки блока в приконтурной зоне карьера с применением электронных систем инициирования и разгрузочных пауз /**
Fig. 7. **Blasted block excavation scheme at the final-wall zone with applying EBS and relief pauses**

Выводы

1. Высококвалифицированное инженерное сопровождение при применении электронных систем инициирования позволяет проводить взрывные работы таким образом, чтобы развал взорванной горной массы имел оптимальные параметры для обеспечения высокопроизводительной экскавации, при этом устойчивость бортов не ухудшалась, а наоборот, сохранялась при увеличении глубины карьеров. Применение разгрузочных пауз совместно с электронными системами инициирования способствует увеличению ширины взрываемых блоков и, как следствие, повышению производительности экскавации.

2. Совмещение неэлектрических и электронных систем инициирования на одном блоке, в одном массовом взрыве, как показал эксперимент, может быть вполне приемлемым и

рациональным решением, при этом можно компенсировать дороговизну электронных детонаторов и относительную сложность работы с ними.

3. Эффективность разгрузочных пауз подтверждается путем измерения сейсмического воздействия внутрискважинными геофонами в законтурной части взрываемого массива. Однако всегда следует принимать во внимание геологические особенности массива, чтобы точнее определить места значительного увеличения времени замедления между скважинными зарядами взрывчатых веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Фокин В.А. Проектирование и производство буровзрывных работ при постановке уступов в конечное положение на предельном контуре глубоких карьеров. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2003: 231.
   Fokin V.A. Design and Production of Drilling and Blasting Operations for Bringing Benches to Their Final Position Along the Final Contour of Deep Open-Pit Mines. Apatity: Publishing House of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2003: 231. (In Russ.).
2. Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. Collingwood: CSIRO Publishing, 2009: 483.
3. Arellano M., Poulakidas E. Efficient use of energy to control bench damage. *Proceedings of the International Society of Explosives Engineers* (*ISEE*). 2008; 1: 1-9.
4. Афанасьев П.И., Белов А.А. Оценка сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам взрыва. *Горная промышленность*. 2025; (3): 138-145. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145.
   Afanasyev P.I., Belov A.A. Assessment of seismic blasting impact on the near-contour rock mass based on the amplitude-frequency characteristics of blasting. *Mining Industry.* 2025; (3): 138-145. (In Russ.). https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145.
5. Маринин М.А., Илюхин Д.А., Рахманов Р.А. и др. Оценка параметров сброса взорванной горной массы в выработанное пространство карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025; 1: 66-79. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_66.
   Marinin M.A., Ilyukhin D.A., Rakhmanov R.A., et al. Assessment of the parameters of blasted rock mass dumping into the mined-out space of an open-pit mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025; (1): 66-79. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_66.
6. Бондаренко И.Ф., Ковалевич С.В., Никитин Р.Я. Оценка интенсивности сейсмических нагрузок от взрывных работ на охраняемые объекты Накынской нефтебазы. *Маркшейдерия и недропользование.* 2023; (6): 68-75. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_6_68_76.
   Bondarenko I.F., Kovalevich S.V., Nikitin R.Ya. Assessment of the intensity of seismic loads from blasting operations on protected facilities of the Nakyn Oil Depot. *Mine Surveying and Subsoil Use.* 2023; (6): 68-75. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_6_68_76.
7. Верхоланцев А.В., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю. и др. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау». *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019; (2): 59-69. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190207.
   Verkholantsev A.V., Dyagilev R.A., Shulakov D.Yu., et al. Monitoring of seismic impact of blasting at the Shakhtau open-pit mine. *Journal of Mining Science and Technology Problems of Mineral Development.* 2019; (2): 59-69. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190207.
8. Господариков А.П., Киркин А.П., Трофимов А.В. и др. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий. *Горный журнал*. 2023; 1: 26-34. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04.
   Gospodarikov A.P., Kirkin A.P., Trofimov A.V., et al. Determination of the physical and mechanical properties of rocks when applying anti-impact unloading measures. *Mining Journal.* 2023; (1): 26-34. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04.
9. Господариков А.П., Выходцев Я.Н., Зацепин М.З. Математическое моделирование воздействия сейсмовзрывных волн на горный массив, включающий выработку. *Записки Горного института*. 2017; 226: 405-411. https://doi.org/10.25515/pmi.2017.4.405.
   Gospodarikov A.P., Vykhodtsev Ya.N., Zatsepin M.Z. Mathematical modeling of the impact of seismic blasting waves on a rock mass containing an excavation. *Journal of Mining Institute.* 2017; 226: 405-411. (In Russ.). https://doi.org/10.25515/pmi.2017.4.405.
10. Богацкий В.Ф., Пергамент В.Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. Москва, 1990: 228.
    Bogatsky V.F., Pergament V.Kh. Seismic Safety in Blasting Operations. Moscow, 1990: 228. (In Russ.).
11. Котиков Д.А., Шабаров А.Н., Цирель С.В. Связь распределения сейсмических событий и тектонической структуры массива горных пород. *Горный журнал*. 2020; (1): 28-32. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.05.
    Kotikov D.A., Shabarov A.N., Tsirel S.V. Relationship between the distribution of seismic events and the tectonic structure of a rock mass. *Mining Journal.* 2020; (1): 28-32. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.05.
12. Наход В.А., Малов А.И., Данилов К.Б. и др. Оценка воздействия взрывных работ на карстовый рельеф заказника (Архангельская область). *ГИАБ*. 2025; (7): 38-54. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_38.
    Nakhod V.A., Malov A.I., Danilov K.B., et al. Assessment of the impact of blasting operations on karst terrain in a nature reserve (Arkhangelsk Region). *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2025; (7): 38-54. In (Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_38.
13. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности при взрывах. Москва, 1946: 29.
    Sadovsky M.A. Simple Methods for Determining Seismic Hazard during Blasting Operations. Moscow, 1946: 29. (In Russ.).
14. Соколов С.Т., Хохлов С.В., Баженова А.В. Оценка влияния взрыва протяженного блока на охраняемый объект. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (9-1): 122-134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_122.
    Sokolov S.T., Khokhlov S.V., Bazhenova A.V. Assessment of the effect of blasting of an extended block on a protected facility. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2023; (9-1): 122-134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_122.
15. Хохлов С.В., Соколов С.Т., Виноградов Ю.И. и др. Проведение промышленных взрывов вблизи газопроводов. *Записки Горного института*. 2021; 247: 48-56. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.6.
    Khokhlov S.V., Sokolov S.T., Vinogradov Yu.I., et al. Conducting industrial blasting operations in the vicinity of gas pipelines. *Journal of Mining Institute. 2021;* 247:48–56. (In Russ.). https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.6.
16. Технические характеристики сейсморегистратора Instantel Minimate Pro, Micromate и геофонов типа ISEE 2-250 Гц: официальный сайт. URL: https://www.instantel.com/products.
    Technical specifications of the Instantel Minimate Pro and Micromate seismographs and ISEE 2–250 Hz geophones: official website. URL: https://www.instantel.com/products (In Russ.).
17. Duvall W.I., Fogelson D.E. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. *US Bur. Mines R15968.* 1962: 19.
18. Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W., et al. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. *Report of Investigation No 8507*. United States. Bureau of Mines, 1980.

19. Кутуев В.А. Анализ методик прогнозирования уровня сейсмического воздействия взрывов на охраняемые объекты и мероприятия по снижению сейсмики. *Взрывное дело*. 2025; 146-103: 133-150.
Kutuev V.A. Analysis of methods for predicting the level of seismic impact of blasting operations on protected facilities and measures to reduce seismic effects. *Explosives Engineering*. 2025; 146-103: 133-150.
20. McKenzie, CK Blasting near open pit walls. *APSSIM 2016 – PM Dight (ed.): Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference, Australian Centre for Geomechanics*. Perth: 83-94. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1604_0.5_McKenzie.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иван Олегович Ковальчук –
аспирант ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: io@kovalchuck.ru

Александр Артурович Добрынин –
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН», г. Москва, Российская Федерация

Руслан Азаматович Рахманов –
канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН», Российская Федерация

Критерии авторства:
Авторы заявляют о преобладающем вкладе И. О. Ковальчука в работу над статьей.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 29.06.2026
Поступила после рецензирования: 17.09.2026
Принята к публикации: 12.10.2026

ABOUT THE AUTHORS

Ivan O. Kovalchuk –
Postgraduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Alexander A. Dobrynin – *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Ruslan A. Rakhmanov –
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Contribution:
The authors declare the predominant contribution of I. O. Kovalchuk to the work on the article.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 29.06.2026
Revised: 17.09.2026
Accepted: 12.10.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.333:622.817.4
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-125-129

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.333:622.817.4

Особенности метановыделения из отрабатываемого угольного пласта в зоне геологических нарушений

Е. В. Федоров, С. Б. Кулибаба✉, Н. А. Милетенко
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова»
Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация
✉ *kulibaba_s@ipkonran.ru*

Резюме. Исследованы фактические данные работы очистного комплекса при пересечении разрывных геологических нарушений угольного пласта и работы в этих зонах скважин предварительной пластовой дегазации. На основе их анализа установлен характер изменения показателей метановыделения в очистное пространство, простоев на проветривание забоя лавы, а также параметров газоотдачи пласта в дегазационные скважины в зависимости от их расположения относительно зон геологических нарушений.

Ключевые слова: разрывные геологические нарушения, опасная зона, метановыделение, дебит метана, пластовая предварительная дегазация

Для цитирования: Федоров Е.В., Кулибаба С.Б., Милетенко Н.А. Особенности метановыделения из отрабатываемого угольного пласта в зоне геологических нарушений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 125-129. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-125-129.

Characteristics of methane emission from a coal seam being mined in zones of geological discontinuities

E. V. Fedorov, S. B. Kulibaba✉, N. A. Miletenko
N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation
✉ *kulibaba_s@ipkonran.ru*

Abstract. Actual operational data from a longwall mining system were investigated regarding the intersection of fault-type geological discontinuities in the coal seam and the performance of preliminary in-seam degasification boreholes within these zones. Based on an analysis of this data, the study established the patterns of change in methane emission rates into the working area, downtime required for face ventilation, and gas yield parameters from the seam into degasification boreholes, depending on the boreholes' positioning relative to the zones of geological discontinuities.

Keywords: fault-type geological discontinuities, hazard zone, methane emission, methane flow r ate, p reliminary in-seam degasification

For citation: Fedorov E.V., Kulibaba S.B., Miletenko N.A. Characteristics of methane emission from a coal seam being mined in zones of geological discontinuities. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 125-129. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-125-129.

Введение

Безопасность и эффективность подземной разработки сверхкатегорийных по метану угольных пластов зависит от степени их дегазации перед началом ведения очистных работ. В настоящее время применение современного высокопроизводительного оборудования при угледобыче в значительной степени сдерживается высокой метанообильностью разрабатываемых угольных пластов, что вызывает снижение нагрузки на очистные забои более, чем в 2,5 раза [1-3].

Метаноносность угольных пластов зависит от общих газодинамических процессов, протекавших в угленосных толщах, и от локальных геологических условий сохранения метана в недрах месторождения – степени метаморфизма угля, природной проницаемости, характера и интенсивности развития геологических нарушений [4, 5].

© Федоров Е. В., Кулибаба С. Б., Милетенко Н. А., 2026

Анализ фактических данных по пересечению фронтом очистных работ геологических нарушений свидетельствует о том, что последние могут оказывать значительное влияние на метановыделение на выемочной участок и дебит метана, каптируемого дегазационными скважинами [6, 7]. Даже мелкоамплитудные геологические нарушения с амплитудой смещения, не превышающей 0,2-0,4 мощности пласта, непосредственно влияют на режим работы очистного забоя, осложняют управление кровлей пласта, ухудшают качество добываемого угля, нарушают нормальное проветривание выемочного участка, повышают вероятность возникновения газодинамических явлений [8-10].

Зоны тектонических нарушений, как правило, характеризуются более низкими физико-механическими свойствами углепородного массива, высокой степенью дробления и трещиноватости, повышенной газоносностью [11, 12]. Наличие в углепородном массиве разрывных геологических нарушений с повышенной газопроницаемостью, изолированных от земной поверхности, обуславливает накопление в них свободного газа. Вскрытие таких разрывов подготовительными или очистными горными выработками сопровождается интенсивными газопроявлениями, и может существенно осложнить очистные работы, несмотря на работу скважин пластовой предварительной дегазации отрабатываемого пласта [13-15].

Методика исследований

Рассмотрим влияние геологических нарушений на показатели метановыделения на выемочный участок и в пластовые дегазационные скважины в условиях шахты

Шахта им. С. М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» разрабатывает пласты Болдыревский и Поленовский и относится к сверхкатегорийной по метану – газоносность угольных пластов на достигнутых глубинах превышает 20 м^3/т. Отработка запасов угля вышележащего пласта Болдыревский ведется с опережением в плане на четыре выемочных столба (1300 м) относительно пласта Поленовский. В почве плата Болдыревский на глубине 9 м залегает пласт Промежуточный мощностью m = 1,6 м. Для выемочных участков рассматриваемых пластов предусмотрена комбинированная схема проветривания с отводом метановоздушной смеси из выработанного пространства с помощью поверхностных газоотсасывающих установок. С целью снижения метановыделения в выработанное пространство выемочных участков пластов и предотвращения выноса метана в действующие горные выработки также предусматривается предварительная пластовая дегазация угольных пластов (ППД) и комплексная дегазация выработанного пространства. Дегазация выработанного пространства на шахте им. С. М. Кирова осуществляется:

– вертикальными скважинами, пробуренными с земной поверхности в купол обрушения горных пород;

– скважинами, пробуренными из горных выработок в купол обрушения;

– трубопроводами, заведенными за изолирующие перемычки.

Рассмотрим влияние геологических нарушений на показатели метановыделения на выемочный участок и в пластовые дегазационные скважины в условиях шахты им. С. М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс»

В выемочном столбе лавы 24-64 пласта Болдыревский выделены четыре опасные зоны разрывных мелкоамплитудных нарушений: зона № 580 с амплитудой 0,4-0,8 м, № 429 (0,4-0,6 м), № 425 (0,3-0,6 м) и № 387 (0,6-1, м). Геологические нарушения № 580, 429 ориентированы вдоль оси выемочного столба лавы, а нарушения № 425, 387 – практически параллельно очистному забою. Протяженность указанных геологических нарушений существенно отличается – от 360 м до 27 м. Соответственно, и время фактического нахождения очистного забоя в опасной зоне геологического нарушения варьировалось от 43 суток до 17 суток.

На рис. 1 в качестве примера представлен геологический разрез по лаве с одним из разрывных нарушений – опасная зона № 387. Геологическое нарушение пересекает под углом падения 25-30° пласт Болдыревский, общая протяженность зоны нарушения по отрабатываемому пласту составляет около 27 м.



Рис. 1. **Геологическое разрывное нарушение зоны № 387 /**
Fig. 1. **Geological fault of zone No. 387**

Оценка влияния зон геологических нарушений на газовую обстановку в лаве осуществлялась по данным системы аэрогазового контроля шахты. Для этого определялись среднесуточные концентрации CH_4 в исходящей струе на выходе из лавы и метановыделение в очистное пространство, а также фактические простои очистного комплекса, связанные с необходимостью проветривания лавы при превышении концентрации метана нормативных значений. Указанные параметры определялись непосредственно в период нахождения очистного забоя в опасной зоне и в сопоставимых по размерам участкам выемочного столба, как до опасной зоны, так и и за ней.

Для оценки влияния геологических нарушений на метановыделение из отрабатываемого угольного пласта выполнялся анализ среднего дебита метана в пластовые скважины предварительной дегазации, удельного метановыделения в скважины $q_{ср}$ и концентрации метана в каптируемой скважиной смеси.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 1 представлены средние величины определенных показателей по всем опасным зонам геологических нарушений в выемочном столбе лавы 24-64 пласта Болдыревский.

Анализ полученных результатов показывает, что при входе очистного забоя в зону геологического нарушения происходит существенное увеличение метановыделения в очистное пространство (рост на 12 %), концентрация метана в исходящей струе увеличивается на 9 %. Результатом указанных изменений является увеличение простоев на проветривание очистного забоя на 20 %.

При выходе из зоны геологического нарушения указанные показатели снижаются, но при этом превышают зафиксированные до входа очистного забоя в опасную зону значения.

При входе очистного забоя в зону геологического нарушения, которая является коллектором, вследствие разгрузки массива вскрывается обширная область перемятых газонасыщенных пород, по которой метан, в том числе из надработанного нижележащего пласта Промежуточный, поступает на выемочный участок, дополнительно осложняя тем самым газовую обстановку в очистном забое.

Таблица 1 / Table 1

Влияние геологического нарушения на метановыделение на выемочный участок / Influence of a geological disturbance on methane emission into a mining section

Показатели	До зоны	В зоне	За зоной
Метановыделение в очистное пространство Q, м³/мин	10,69	11,96	11,45
Концентрация метана в исходящей струе, %	0,62	0,67	0,65
Простои на проветривание лавы, мин/сут.	193	231	198

В условиях высокой природной газоносности отрабатываемого пласта Болдыревский (свыше 20 м³/т) на шахте применяется комплексная дегазация источников метановыделения, включающая в себя, в том числе, предварительную пластовую дегазацию (ППД). Указанная дегазация осуществляется перекрещивающимися скважинами длиной 185 м, которые бурятся под углами 60° и 80° к линии очистного забоя лавы из оконтуривающих выемочный столб подготовительных выработок. Срок каптажа метана скважинами ППД составляет в среднем от 400 до 600 суток до момента подхода к ним очистного забоя и демонтажа.

Для оценки влияния геологических нарушений на метановыделение в дегазационные скважины ППД был выполнен анализ работы пробуренных в пласт Болдыревский нисходящих и восходящих скважин, расположенных в 50-70 м до и после геологического нарушения, а также непосредственно в его зоне. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Влияние геологического нарушения на метановыделение в пластовые дегазационные скважины / Influence of a geological disturbance on methane emission into in-seam degasification boreholes

Показатели	До зоны	В зоне	За зоной
Средний дебит пластовых дегазационных скважин, м³/мин	0,0024	0,0021	0,0024
Удельное метановыделение в скважины $q_{ср.}$, м³/м²сут.	0,0096	0,0091	0,0098
Концентрация CH_4 в каптируемой скважинами смеси, %	7,71	7,35	8,03

Как видно из таблицы, характер метановыделения в дегазационные скважины, пробуренные в зоне нарушения, прямо противоположен показателям метановыделения в очистной забой лавы. Если переход лавы через зону геологического нарушения сопровождается ростом метановыделения в очистное пространство, то здесь наоборот, и дебит скважин, и удельное метановыделение в скважины, и концентрация каптируемого метана в зоне геологического нарушения существенно ниже, чем для аналогичных скважин за пределами зоны влияния нарушения.

Установлено, что снижение концентрации CH_4 в каптируемой метановоздушной смеси составляет 9 % и 4 % соответственно для нисходящих (срок каптажа 630 сут.) и восходящих (срок каптажа 440 сут.) скважин в зоне геологического нарушения в сравнении со скважинами, работающими в крыльях геологического нарушения (до зоны и после зоны разрывного нарушения) при прочих равных условиях.

На рис. 2 представлен характер изменения метановыделения в очистное пространство и удельного метановыделения в дегазационные скважины пластовой предварительной дегазации в зонах геологических нарушений угольного пласта: 1 – до зоны, 2 – в зоне, 3 – за зоной.



Рис. 2. **Изменение характера метановыделения в зонах геологических нарушений. 1, 2, 3 – соответственно до зоны, в зоне и за зоной нарушений / *Fig. 2.* Changes in the nature of methane emission in zones of geological disturbances. 1, 2, 3 – before the disturbance zone, within the zone, and beyond the zone, respectively**

Выводы

Выполненные исследования показали, что характер метановыделения в очистное пространство и в пластовые скважины предварительной дегазации существенно отличаются.

При входе очистного забоя в зону геологического нарушения вскрывается на обширной площади зона перемятых газонасыщенных пород, происходит разгрузка от горного давления углепородного массива в почве отрабатываемого пласта, что приводит к росту метановыделения в очистное пространство, а соответственно, и вынужденных простоев на проветривание лавы.

После выхода очистного забоя из зоны влияния геологического нарушения показатели метановыделения и концентрации метана в исходящей струе снижаются, оставаясь при этом несколько выше соответствующих показателей, фиксируемых при работе лавы на участке выемочного столба до зоны нарушения.

Характер метановыделения в пластовые скважины предварительной дегазации противоположен выявленным закономерностям метановыделения в очистное пространство. Дегазационные скважины, пробуренные в зонах геологического нарушения, показывают при прочих равных условиях в течение всего срока каптажа (400-600 суток) на 12-15 % меньший средний дебит скважин и на 6-10% более низкие показатели удельного метановыделения по сравнению с аналогичными скважинами, работающими за пределами таких зон.

Указанные различия в газоотдаче пласта в дегазационные скважины связаны с тем, что при подготовке выемочного столба зоны геологических нарушений вскрываются и частично дегазируются подготовительными выработками – вентиляционной и конвейерной печами лавы 24-64. Именно поэтому у скважин ППД, пробуренных и работающих в этой частично дегазированной зоне геологических нарушений удельное метановыделение, концентрация метана и средний дебит ниже чем у соседних кустов аналогичных скважин, расположенных за пределами зоны нарушения.

Таким образом, наличие в угольном пласте зон разрывных геологических нарушений при их пересечении очистным забоем оказывает значимое влияние на параметры метановыделения на выемочный участок и дебит метана, каптируемого скважинами пластовой предварительной дегазации, что требует своевременного выявления таких зон и принятия мер по заблаговременной интенсификации газоотдачи в скважины на таких участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Рубан А.Д., Забурдяев В.С., Матвиенко Н.Г., Артемьев В.Б. Основы проектирования дегазации угольных шахт и рудников России. Т. 9: Рудничная аэрология. М.: Библиотека горного инженера, 2011; 271.
   Ruban A.D., Zaburdyaev V.S., Matvienko N.G., Artemyev V.B. Fundamentals of Designing Degassing Systems for Russian Coal Mines. Vol. 9: Mine Aerology. Moscow: Mining Engineer's Library, 2011; 271. (In Russ.).
2. Ютяев Е.П. Проблемы совершенствования технологии пластовой дегазации в условиях интенсивной разработки. *ГИАБ.* 2015; 7: 253-261.
   Yutyaev E.P. Challenges in Improving Seam Degassing Technology Under Conditions of Intensive Mining. *GIAB.* 2015; 7: 253-261. (In Russ.).
3. Шмат В.Н. Разработка технологии пластовой дегазации выбросоопасных пластов в условиях их интенсивной и безопасной отработки. *ГИАБ*. 2014; 6: 185-201.
   Shmat V.N. Development of Seam Degassing Technology for Outburst-Prone Seams During Intensive and Safe Mining Operations. *GIAB*. 2014; 6: 185-201. (In Russ.).
4. Сластунов С.В., Ермак Г.П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт. *Уголь*. 2013; 1: 21-24.
   Slastunov S.V., Ermak G.P. Justification of Selection and Effective Implementation of Degassing Methods During Intensive Mining of Gassy Coal Seams: A Key Issue in Ensuring Methane Safety in Coal Mines. *Ugol*. 2013; 1: 21-24. (In Russ.).
5. Малышев Ю.Н., Айруни А.Т. Комплексная дегазация угольных шахт. М: Изд-во Академии горных наук, 1999; 327.
   Malyshev Yu.N., Airuni A.T. Integrated Degassing of Coal Mines. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 1999; 327. (In Russ.).
6. Окалелов В.Н., Лисянский П.Л. О метановыделении в окрестности геологических нарушений. Сборник научных трудов ДонГТУ. 2012; 37: 64–68.
   Okalelov V.N., Lisyansky P.L. On Methane Emission in the Vicinity of Geological Faults. Collection of Scientific Papers of DonGTU. 2012; 37: 64–68. (In Russ.).
7. Забурдяев В.С., Малинникова О.Н., Трофимов В.А. Метанообильные шахты: добыча угля, газовыделение, метановая опасность. Калуга: Изд-во Манускрипт, 2020: 334.
   Zaburdyaev V.S., Malinnikova O.N., Trofimov V.A. High-Methane Mines: Coal Extraction, Gas Emission, and Methane Hazards. Kaluga: Manuskript Publishing House, 2020: 334. (In Russ.).
8. Norbert S., Pajdak A., Kozieł K., Braga L.T.P. Methane Emission during Gas and Rock Outburst on the Basis of the Unipore Model. *Energies*. 2019; 12 (10): 1999. https://doi.org/10.3390/en12101999.
9. Лупий М.Г. Исследование газопроницаемости пород междупластий после их подработки и надработки с учетом геодинамических и геомеханических факторов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (2): 60–68. https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-60-68.
   Lupiy M.G. Investigation of gas permeability of inter-seam rocks following under-mining and over-mining, taking into account geodynamic and geomechanical factors. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025; 25 (2): 60–68. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-60-68.
10. Шубина Е.А., Харкевич А.С. Особенности и проблемы расчёта и построения границ опасных зон у разрывных нарушений угольных пластов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 2: 44–55. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_44_55.
    Shubina E.A., Kharkevich A.S. Specifics and challenges in calculating and delineating hazard zones associated with faulting in coal seams. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023; 2: 44–55. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_44_55.
11. Григорьев В.Е., Любич Г.А., Тихонова С.Д. Горно-геометрический анализ разрывных нарушений угольных пластов. *Уголь*. 1988; 6: 61-63.
    Grigoryev V.E., Lyubich G.A., Tikhonova S.D. Mining-geometric analysis of coal seam faults. *Ugol*. 1988; 6: 61-63. (In Russ.).
12. Очеретенко И.А., Корицкий А.А., Шевелягин Е.В. Пластовые тектонические нарушения и их влияние на разработку углей. Роль тектоники в формировании горно-геологических факторов угольных месторождений. Л.: ВСЕГЕИ, 1983: 161-169.
    Ocheretenko I.A., Koritsky A.A., Shevelyagin E.V. Tectonic seam faults and their impact on coal mining. The role of tectonics in the formation of mining-geological factors in coal deposits. Leningrad: VSEGEI, 1983: 161–169. (In Russ.).
13. Шевченко Л. А., Костеренко В. Н., Смирнов О. В. Аэрология горных предприятий. М.: Горная книга, 2020: 224.
    Shevchenko L. A., Kosterenko V. N., Smirnov O. V. Aerology of mining enterprises. Moscow: Gornaya Kniga, 2020: 224. (In Russ.).
14. Усенбеков М.М., Исабек Т.К., Полчин А.И., Жумабаева А.К. Динамика метановыделений при ведении горных работ в зонах геологических нарушений. *ГИАБ*. 2022; 12: 141-151. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_141.
    Usenbekov M. M., Isabek T. K., Polchin A. I., Zhumabaeva A. K. Dynamics of methane emission during mining operations in zones of geological disturbances. *GIAB*. 2022; 12: 141–151. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_141.
15. Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П. Разработка и совершенствование технологий пластовой дегазации для эффективной и безопасной отработки угольных пластов. *ГИАБ*. 2018; 11: 13-22. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22.
    Slastunov S. V., Yutyaev E. P., Mazanik E. V., Sadov A. P. Development and improvement of in-seam degassing technologies for efficient and safe coal seam mining. *GIAB*. 2018; 11: 13–22. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Вячеславович Федоров –
канд. техн. наук, зав. отделом,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: fedorov_e@ipkonran.ru

Сергей Борисович Кулибаба –
д-р техн. наук, проф., вед. научн сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-8051-7381; e-mail: kulibaba_s@ipkonran.ru

Наталья Александровна Милетенко –
канд. техн. наук, ст. научн сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0002-5594-3036;
e-mail: nmilet@mail.ru

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе в работу.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 24.08.2026
Поступила после рецензирования: 10.09.2026
Принята к публикации: 13.10.2026

ABOUT THE AUTHOR

Evgeniy V. Fedorov –
Cand. Sci. (Eng.), Department Head, N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
e-mail: fedorov_e@ipkonran.ru

Sergey B. Kulibaba –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher, N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0001-8051-7381;
e-mail: kulibaba_s@ipkonran.ru

Natalya A. Miletenko –
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0002-5594-3036;
e-mail: nmilet@mail.ru

Contribution:
The authors declare the equal contribution to the work in the article.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 24.08.2026
Revised: 10.09.2026
Accepted: 13.10.2026

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.333:622.817.4
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-130-135

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.333:622.817.4

Связь содержания железа и серы с газоносностью и неоднородностью микроструктуры углей

И. Н. Горшенков✉, Б. Н. Пашичев, Е. В. Ульянова
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова»
Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация
✉ *gorshenkov.in@mail.ru*

Резюме. Безопасность подземной разработки метаноносных угольных пластов во многом определяется газокинетическим состоянием массива. При этом исследования показывают, что метаноносность и интенсивность выделения метана могут существенно различаться в пределах одного угольного пласта даже при сходных геологических условиях его формирования. Это свидетельствует о необходимости учитывать свойства угольного вещества, связанные с его газоносностью, способностью к удерживанию и естественной отдачей метана. Целью исследования является выявление связи содержания железа (*Fe*), серы (*S*) и пирита (FeS_2), а также относительного баланса железо- и серосодержащих компонентов (*Fe/S*) с составляющими общей газоносности и микроструктурной организацией угля. Содержание *Fe* и *S* определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа. Составляющие общей газоносности Q_1, Q_2, Q_3 и $Q\Sigma$ определялись по методике, разработанной ИПКОН РАН, а средние значения информационной энтропии H и статистической сложности C рассчитывались по сериям СЭМ-изображений. Выявлены положительные связи содержания железа, серы и пирита с Q_1, Q_2, Q_3 и общей газоносностью $Q\Sigma$. При увеличении *Fe/S* средняя энтропия уменьшается, а средняя статистическая сложность возрастает; направление связей сохраняется при последовательном исключении отдельных наблюдений. Полученные зависимости могут применяться при сравнении участков пласта для контроля метановыделения, обоснования вентиляционных и дегазационных мероприятий. Результаты согласуются с гипотезой о возможном участии железосодержащих минералов в формировании метана, однако не доказывают конкретный механизм его образования.

Ключевые слова: угольный пласт, метаноносность, газоотдача, железо, сера, пирит, рентгенофлуоресцентный анализ, микроструктура угля, информационная энтропия, статистическая сложность

Для цитирования: Горшенков И.Н., Пашичев Б.Н., Ульянова Е.В. Связь содержания железа и серы с газоносностью и неоднородностью микроструктуры углей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 130-135. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-130-135.

Relationships of iron and sulfur content with gas content and heterogeneity of microstructure of coals

I. N. Gorshenkov✉, B. N. Pashichev, E. V. Ulyanova
Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ *gorshenkov.in@mail.ru*

Abstract. The safety of underground mining of methane-bearing coal seams is largely determined by the gas-kinetic state of the rock mass. Studies show that methane content and methane-emission intensity may vary substantially within the same coal seam even under similar geological conditions of its formation. This indicates the need to consider the properties of coal associated with its gas content, its ability to retain methane, and the natural release of methane. The aim of the study is to identify the relationships of the contents of iron (*Fe*), sulfur (*S*), and pyrite (FeS_2), as well as the relative balance of iron- and sulfur-bearing components (*Fe/S*), with the components of total gas content and the microstructural organization of coal. The contents of Fe and S were determined by X-ray fluorescence analysis. The components of total gas content Q_1, Q_2, Q_3, and $Q\Sigma$ were determined using the method developed at ICEMR RAS, while the mean values of information entropy H and statistical complexity C were calculated from series of SEM images. Positive relationships were found between the contents of iron, sulfur, and pyrite and Q_1, Q_2, Q_3, and total gas content $Q\Sigma$. As Fe/S

© Горшенков И. Н., Пашичев Б. Н., Ульянова Е. В., 2026

increased, mean entropy decreased and mean statistical complexity increased; the directions of the relationships remained unchanged when individual observations were sequentially excluded. The relationships obtained may be used when comparing different sections of a coal seam to control methane emissions and substantiate ventilation and degassing measures. The results are consistent with the hypothesis that iron-bearing minerals may participate in methane formation but do not prove a specific mechanism of its formation.

Keywords: coal seam, methane content, gas emission, iron, sulfur, pyrite, X-ray fluorescence a nalysis, c oal microstructure, information entropy, statistical complexity

For citation: Gorshenkov I.N., Pashichev B.N., Ulyanova E.V. Relationships of iron and sulfur content with gas content and heterogeneity of microstructure of coals. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 130-135. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-130-135.

Введение

Метан является одним из основных факторов риска при подземной добыче угля. Его количество и характер выделения определяют требования к газовому контролю, режимам проветривания и дегазации, а также влияют на характер локального накопления метана и образования взрывоопасных метанопылевоздушных смесей. Действующие методы прямого определения газоносности дают необходимую количественную оценку содержания газа, однако одинаковая общая газоносность может соответствовать угольным пластам с различными свойствами в отношении удерживания и отдаче метана [1–3, 13]. Поэтому для интерпретации газового состояния пласта важно учитывать не только общую газоносность, но и микроструктурные особенности и минеральные составляющие угля.

Железо и сера присутствуют в углях в различных минеральных и органических формах. Одним из распространенных железосодержащих минералов является пирит FeS_2, однако железо может входить также в другие минеральные и органоминеральные компоненты [14].

Рентгенофлуоресцентный анализ определяет содержащиеся элементы, но не позволяет идентифицировать составляемые ими минеральные формы. По этой причине железо, сера, пирит и отношение *Fe/S* отражают разную информацию [4, 5, 8, 14].

В зарубежных исследованиях экспериментально проверена гипотеза о том, что одним из механизмов образования метана в угольных пластах может быть гидрирование CO_2 на восстановленном железосодержащем катализаторе при температурах, сопоставимых с условиями катагенеза. В контрольных опытах без восстановленного катализатора метан не обнаруживался [6]. В другом зарубежном исследовании рассмотрено влияние соединений железа на перестройку углеродной матрицы и образование метана [7]. Молекулярное моделирование также показывает, что сопутствующие минералы способны изменять адсорбцию метана и механические свойства угольной матрицы [15]. Эти работы обосновывают проверяемую гипотезу о возможном участии железосодержащих минералов в каталитических процессах и взаимодействии угля с метаном.

В отечественных работах изучены различия в содержании железа и серы в углях из выбросов и неопасных зон, а также показано, что соотношение железа и серы относительно стехиометрии пирита связано с газодинамическими свойствами [4]. Также была установлена связь содержания пирита, оцененного по данным элементного анализа, с газонасыщенностью призабойной зоны [5]. Отличие настоящей работы состоит в том, что определялась связь железо- и серосодержащих компонентов с газоносностью и с неоднородностью микроструктуры.

Целью работы является установление связи содержания железа, серы, пирита и отношения *Fe/S* с составляющими общей газоносности и параметрами микроструктурной неоднородности, а также обоснование возможности использования этих показателей при характеристике газоносности, удерживания метана и микроструктурного состояния угля.

Научная новизна исследования состоит в установлении связи отношения *Fe/S* с количественными параметрами неоднородности микроструктуры, что позволило сопоставить относительный баланс железо- и серосодержащих минеральных составляющих с микроструктурным состоянием угольного вещества и составляющими общей газоносности.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования являлись угольные пробы, отобранные на шахтах имени А. Д. Рубана, «7 Ноября-Новая», «Талдинская-Западная-1», имени С. М. Кирова, имени В. Д. Ялевского и «Комсомолец» Кузнецкого угольного бассейна. В выборку вошли пробы пластов Полысаевского, Сычевского, Болдыревского, Поленовского, Толмачевского, а также пластов 50, 52, 66 и 69.

Составляющие общей газоносности определялись по методике, разработанной ИПКОН РАН [1]. Q_1 характеризует количество метана, естественно выделившегося в первые минуты преимущественно из трещин и открытых макропор. Q_2 характеризует количество метана, продолжающего естественно выделяться из внутренних участков угольного вещества за счет фильтрационно-диффузионных процессов. Q_3 – количество метана, высвобождаемое после механического разрушения пробы и характеризующее удерживаемую составляющую общей газоносности. Общая газоносность рассчитывалась как $Q\Sigma = Q_1 + Q_2 + Q_3$. где Q_1 и Q_2 рассматривались как газокинетические показатели естественной газоотдачи, при этом Q_2 в большей степени связан с переносом газа изнутри неоднородной микроструктуры [1–3].

Определение содержания железа и серы выполнялось методом рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе ЭКРОС XRF-9710 PEARL. Перед прессованием уголь измельчался до порошкообразного состояния и тщательно перемешивался. В пресс-форме предварительно формировалась таблетка-подложка из сухой борной кислоты диаметром 20 мм с центральным цилиндрическим углублением. В сформированное углубление помещалась навеска подготовленного угольного порошка, после чего проба совместно с подложкой прессовалась при давлении 2,5–3 МПа. Борная кислота использовалась в качестве подложки, обеспечивающей механическую целостность прессованной пробы и не содержащей определяемых элементов *Fe* и *S*. Диапазон давления 2,5–3 МПа был выбран экспериментально по результатам предварительной подготовки проб, так как при меньшем

давлении таблетка оставалась недостаточно прочной и легко разрушалась, тогда как при превышении указанного диапазона наблюдались растрескивание и разрушение сформированной пробы. Количественное определение выполнялось по градуировочным зависимостям «интенсивность–концентрация», построенным по эталонным смесям с известными массовыми долями *Fe* и *S* [8].

Поскольку РФА не определяет минеральные формы, содержание пирита оценивалось стехиометрически по сере. Массовая доля серы в FeS_2 составляет 0,534, поэтому использовалось выражение:

$$FeS_2 = S / 0{,}534 \approx 1{,}87 \cdot S.$$

Расчет выполнялся по *S*, поскольку во всех исследованных образцах фактическое содержание *Fe* превышало количество железа, стехиометрически необходимое для связывания измеренной серы в FeS_2. Таким образом, сера являлась ограничивающим элементом.

Отношение *Fe/S* рассчитывалось по измеренным массовым долям элементов и рассматривалось как показатель относительного баланса железосодержащих и серосодержащих компонентов угля. Для чистого пирита стехиометрическое массовое отношение *Fe/S* равно 0,871, однако это значение использовалось только как ориентир. Показатель *Fe/S* не определяет количество пирита, но позволяет сравнивать образцы по относительному балансу железосодержащих и серосодержащих минеральных составляющих и отделять вариации этого баланса от изменений абсолютного содержания *Fe* и *S*.

Микроструктуру изучали по сериям цифровых изображений естественной поверхности угля. Снимки получали на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV с 1000-кратным увеличением при одинаковых условиях съёмки. Количественная обработка СЭМ-изображений применяется для описания структурной неоднородности угля, и позволяет выявлять связь неоднородности с адсорбцией метана [16, 17]. Изображения обрабатывались по алгоритму с применением библиотек Python и PyShearlets. Информационная энтропия *H* отражает неоднородность распределения структурных признаков на цифровом изображении: ее увеличение соответствует более неупорядоченной организации изображения. Статистическая сложность *C* учитывает внутреннее разнообразие таких признаков, посредством оценки отличия их распределения от равновероятного состояния, характеризуя организованность структуры между абсолютным порядком и предельным хаосом [9–12]. Для каждого образца использовались средние H^- и C^- по серии изображений.

Связи оценивались коэффициентами Пирсона *r* и Спирмена *ρ*. Коэффициент Пирсона характеризует направление и силу линейной связи, коэффициент Спирмена – направление и силу монотонной ранговой связи. При $p < 0{,}050$ связь рассматривалась как статистически значимая на принятом уровне значимости. Устойчивость связей *Fe/S* с H^- и C^- проверялась последовательным исключением каждого отдельного образца.

Результаты исследований

Характеристики содержания *Fe*, *S*, FeS_2 и отношения *Fe/S* представлены в таблице 1.

Содержание *Fe* изменяется от 0,57 до 2,60 %, S – от 0,25 до 0,62 %. Содержание пирита, оцененное по сере, составляет 0,47-1,16 %. Изменение *Fe* не повторяет изменение *S*, что подтверждает необходимость раздельного исследования обоих экспериментально определяемых элементов. Отношение *Fe/S* изменяется от 1,32 до 6,66 и во всех образцах превышает стехиометрическое значение для FeS_2.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики содержания *Fe*, *S*, FeS_2 и отношения *Fe/S* / Characteristics of *Fe*, *S* and FeS_2 contents and *Fe/S* ratio

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана	Коэффициент вариации, %
Fe, %	0,57	2,60	1,65	1,78	34,6
S, %	0,25	0,62	0,43	0,43	27,0
FeS_2, %	0,47	1,16	0,80	0,80	27,0
Fe/S	1,32	6,66	4,02	3,97	35,3

Связь *Fe* и *S* с составляющими общей газоносности

На рисунке 1 отражено визуальное распределение исследованных проб угля на плоскости «содержание элемента – общая газоносность». В таблице 2 представлены результаты расчетов корреляционных коэффициентов.

Для железа установлена положительная связь с общей газоносностью: $r = +0{,}428$ при $p = 0{,}033$ и $\rho = +0{,}482$ при $p = 0{,}015$. Связь Fe с Q_3 также положительна: $r = +0{,}439$ при $p = 0{,}028$ и $\rho = +0{,}481$ при $p = 0{,}015$. Для Fe и Q_1 получено $\rho = +0{,}589$ при $p = 0{,}002$, а для Fe и Q_2 – $\rho = +0{,}429$ при $p = 0{,}033$.

Для серы установлена положительная связь с общей газоносностью: $r = +0{,}587$ при $p = 0{,}002$ и $\rho = +0{,}571$ при $p = 0{,}003$. Положительные связи установлены также для $S–Q_1$ ($r = +0{,}430$; $p = 0{,}032$; $\rho = +0{,}552$; $p = 0{,}004$), $S–Q_2$ ($r = +0{,}465$; $p = 0{,}019$; $\rho = +0{,}559$; $p = 0{,}004$) и $S–Q_3$ ($r = +0{,}554$; $p = 0{,}004$; $\rho = +0{,}571$; $p = 0{,}003$).

Поскольку оценка FeS_2 является линейным преобразованием *S*, её связь с составляющими общей газоносности имеет то же направление.

Таблица 2 / Table 2

Связь показателей содержания минеральных составляющих с составляющими общей газоносности и параметрами микроструктуры / Relationships of mineral constituent parameters with components of total gas content and microstructural characteristics

Отношение	*r* Пирсона	*p*	*ρ* Спирмена	*p*
$Fe – Q_1$	+0,211	0,311	+0,589	0,002
$Fe – Q_2$	+0,248	0,232	+0,429	0,033
$Fe – Q_3$	+0,439	0,028	+0,481	0,015
$Fe – Q\Sigma$	+0,428	0,033	+0,482	0,015
$S – Q_1$	+0,430	0,032	+0,552	0,004
$S – Q_2$	+0,465	0,019	+0,559	0,004
$S – Q_3$	+0,554	0,004	+0,571	0,003
$S – Q\Sigma$	+0,587	0,002	+0,571	0,003
$FeS_2 – Q_1$	+0,430	0,032	+0,552	0,004
$FeS_2 – Q_2$	+0,465	0,019	+0,559	0,004
$FeS_2 – Q_3$	+0,554	0,004	+0,571	0,003
$FeS_2 – Q\Sigma$	+0,587	0,002	+0,571	0,003
$Fe/S – H^-$	–0,580	0,002	–0,458	0,019
$Fe/S – C^-$	+0,546	0,004	+0,448	0,022

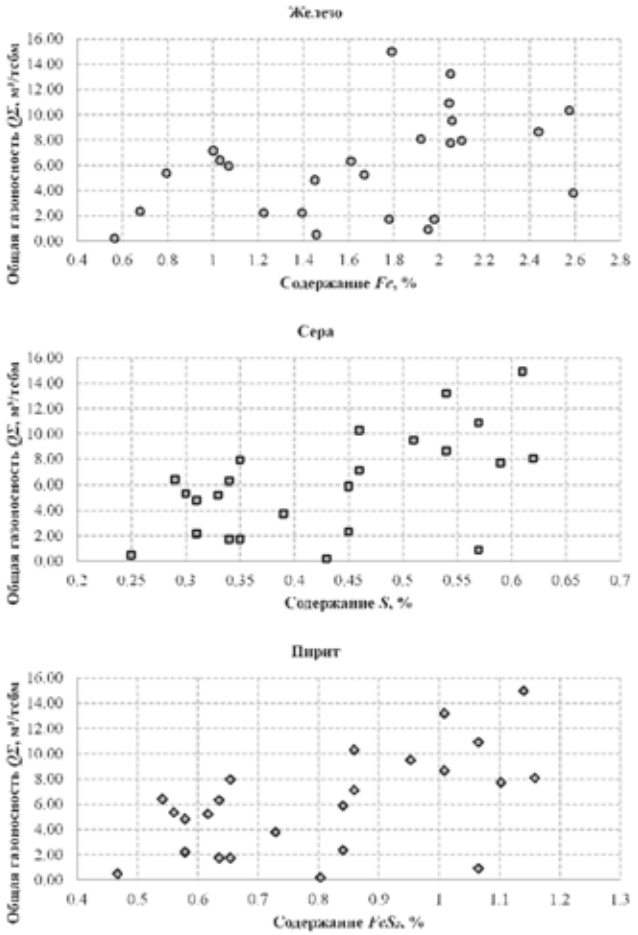


Рис. 1. **Связь содержания железа, серы и пирита с общей газоносностью /**
Fig. 1. **Relationship of iron, sulfur, and pyrite content to total gas content**

Связь *Fe/S* с неоднородностью микроструктуры

Анализ связи изменения отношения *Fe/S*, как количественной характеристики относительного баланса железосодержащих и серосодержащих компонентов и распределения значений *H* и *C*, как количественных характеристик структурной неоднородности, показал следующее: с увеличением *Fe/S* средняя энтропия H^- уменьшается, а средняя статистическая сложность C^- возрастает. При последовательном исключении каждого отдельного наблюдения коэффициент Пирсона для *Fe/S*–H^- оставался отрицательным и изменялся от −0,629 до −0,492, а для *Fe/S*–C^- оставался положительным и изменялся от +0,450 до +0,618; ранговые коэффициенты также сохраняли направление. Результат показывает, что изменение относительного баланса железосодержащих и серосодержащих компонентов сопровождается изменением организации микроструктуры угля.

Обсуждение результатов

В результате исследования установлены две группы взаимосвязей. Первая – между содержанием *Fe* и *S*, а также расчётным содержанием FeS_2, с одной стороны, и составляющими общей газоносности Q_1, Q_2, Q_3 и $Q\Sigma$ с другой. Вторая – между отношением *Fe/S* и параметрами микроструктурной неоднородности H^- и C^-. Эти группы взаимосвязей отражают разные аспекты состояния угля. В первой группе увеличение содержания *S* и расчетного содержания пирита, оцененного по *S*, сопровождается увеличением $Q\Sigma$, а для *Fe* выявлены положительные связи с отдельными составляющими общей газоносности. Вторая группа характеризует связь относительного баланса железо- и серосодержащих компонентов с микроструктурным состоянием угольного вещества, поскольку *Fe/S* связан с H^- и C^-.

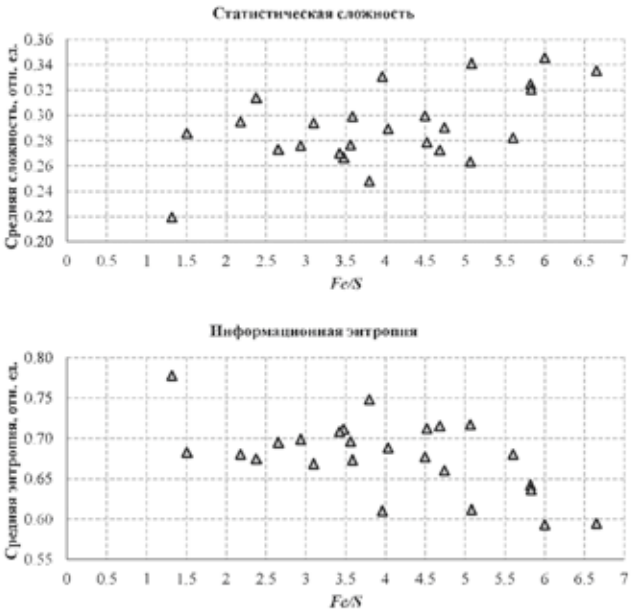


Рис. 2. **Связь отношения *Fe/S* со средней информационной энтропией H^- и средней статистической сложностью C^-/**
Fig. 2. **Relationship between the *Fe/S* ratio, average information entropy H^-, and average statistical complexity C^-**

Полученные результаты согласуются с предшествующими данными о связи железа и пирита со способностью угля к удержанию метана и газонасыщенностью угля [5], с экспериментально показанной возможностью образования метана в присутствии железосодержащих катализаторов [6, 7] и с данными о влиянии сопутствующих минералов на адсорбцию метана [15]. Поэтому содержание *Fe*, *S* и оцененное содержание пирита целесообразно рассматривать как показатели минеральных составляющих, связанных с газоносностью угля и удерживанием метана.

Связь *Fe* с Q_3 представляет отдельный интерес. Q_3 высвобождается после механического разрушения пробы и характеризует метан, удерживаемый в угольном веществе до разрушения. Положительная ранговая связь *Fe* с Q_3 указывает на согласованное изменение этих показателей. Для выяснения природы этой связи необходимы прямое определение минеральных фаз и исследование распределения железосодержащих включений относительно порово-трещинной структуры.

Энтропия и сложность описывают разные стороны организации изображения угольной поверхности: энтропия характеризует неупорядоченность распределения признаков, а сложность – степень их внутренней неоднородности. Совместное изменение обеих величин означает смещение микроструктурного состояния. Такая интерпретация согласуется с исследованиями, в которых цифровые характеристики СЭМ-изображений и показатели неоднородности микропор рассматриваются как взаимодополняющие характеристики угольной структуры [16, 17].

Современные зарубежные исследования дополнительно показывают, что характеристики микроструктуры угля тесно связаны с процессами сорбции и десорбции метана. Установлено, что адсорбционно-десорбционные процессы могут

сопровождаться изменением микропоровой и микрокристаллической структуры угля и формированием гистерезиса десорбции [18], а механизм адсорбции CH_4 определяется развитием порового пространства и условиями сорбции [19]. Изменение молекулярной и поровой структуры также сопровождается изменением метаноадсорбционной способности угля [20]. Эти данные подтверждают целесообразность совместного рассмотрения микроструктурных характеристик, показателей общей газоносности, удерживания и отдачи метана.

Практическое значение

Для проб из разных участков пласта определяют *Fe* и *S*, оценивают содержание пирита по *S* и рассчитывают *Fe/S*. Содержание *Fe*, *S* и пирита сопоставляют с $Q\Sigma$ и Q_3, а *Fe/S* – с H и C. Такое сопоставление позволяет различать участки по содержанию и относительному балансу минеральных составляющих, связанным с общей газоносностью и удерживанием метана, а также по микроструктурному состоянию.

На шахте исследование может выполняться последовательно: отбор проб по длине выработки или лавы; прямое определение Q_1, Q_2, Q_3 и $Q\Sigma$ по методике ИПКОН РАН; рентгенофлуоресцентный анализ *Fe* и *S*; оценка содержания пирита по *S* и расчёт *Fe/S*; расчёт средних H и C по сериям СЭМ-изображений; сравнение участков и формирование локальной базы конкретного пласта.

Результаты предназначены для выделения участков, требующих более детального контроля метановыделения, и для обоснования вентиляционных и дегазационных мероприятий, направленных на снижение вероятности локального скопления метана в выработках и образования взрывоопасных метанопылевоздушных смесей [21, 22].

Заключение

Методом рентгенофлуоресцентного анализа определено содержание железа и серы. По сере оценено содержание пирита. Содержание железа и серы изменяется несинхронно. Расчет содержания пирита позволил охарактеризовать минеральную составляющую угля.

Содержание железа, серы и пирита связано с показателями естественной газоотдачи Q_1 и Q_2, удерживаемой составляющей Q_3 и общей газоносностью $Q\Sigma$. Результаты характеризуют связь минеральных составляющих угля с естественной газоотдачей, удерживаемой составляющей общей газоносности и общей газоносностью угля.

Отношение *Fe/S* характеризует относительный баланс железосодержащих и серосодержащих компонентов. При увеличении *Fe/S* средняя энтропия H уменьшается, а средняя статистическая сложность C возрастает; направление связей устойчиво к исключению отдельных образцов.

Совместное рассмотрение минеральных составляющих угля, составляющих его общей газоносности и микроструктурных показателей позволяет сравнивать участки пласта по общей газоносности, способности удерживать и естественно отдавать метан и использовать результаты для контроля метановыделения, обоснования вентиляционных и дегазационных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ГОСТ Р 70830–2023 (ИСО 18871: 2015). Горное дело. Метод определения содержания метана в угольных пластах. Москва: Российский институт стандартизации; 2023. GOST R 70830–2023 (ISO 18871: 2015). Mining. Method for determining methane content in coal seams. Moscow: Russian Institute for Standardization; 2023. (In Russ.).
2. Горшенков И.Н. Оценка газодинамической опасности угольных пластов в зависимости от неоднородности микроструктуры угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 50-55. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55. Gorshenkov I.N. Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on coal microstructure heterogeneity. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 50-55. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55.
3. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Федоров Е.В., Горшенков И.Н., Пашичев Б.Н. Кинетика газовыделения метана из угля различной микроструктурной неоднородности. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025; (6): 36-43. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250604. Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Fedorov E.V., Gorshenkov I.N., Pashichev B.N. Kinetics of methane emission from coal of different microstructural nonuniformity. *Journal of Mining Science*. 2025; 61 (6): 893-899. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250604.
4. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Пашичев Б.Н., Долгова М.О. Связь включений железа и серы в ископаемых углях с их склонностью к газодинамическим явлениям. *Химия твердого топлива*. 2020; (2): 50–54. https://doi.org/10.31857/S0023117720020115. Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Pashichev B.N., Dolgova M.O. Relationship of iron and sulfur inclusions in fossil coals with their tendency to gas-dynamic phenomena. *Solid Fuel Chemistry*. 2020; (2): 50–54. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0023117720020115.
5. Захаров В.Н., Ульянова Е.В., Малинникова О.Н. Вклад минеральных включений в накопление и удержание метана в угольных пластах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023; (5): 3–11. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230501. Zakharov V.N., Ulyanova E.V., Malinnikova O.N. Contribution of mineral impurities to coalbed methane accumulation and retention. *Journal of Mining Science*. 2023; 59 (5): 705-712. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230501.
6. Medina J.C., Butala S.J., Bartholomew C.H., Lee M.L. Iron-catalyzed CO_2 hydrogenation as a mechanism for coalbed gas formation. *Fuel.* 2000; 79 (1): 89-93. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00131-3.
7. Skoblik A.P., Shanina B.D., Kolesnik V.N., Konchits A.A., Gavriljuk V.G. A modeling for effect of iron compounds on methane formation in the coal. *Fuel.* 2012; 98: 124-130. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.080.
8. Ревенко А.Г., Пашкова Г.В. Применение рентгенофлуоресцентного метода анализа для исследования состава угля и золы. *Аналитика*. 2022; 12 (6): 410-419. https://doi.org/10.22184/2227-572X.2022.12.6.410.419. Revenko A.G., Pashkova G.V. Application of X-ray fluorescence analysis for studying the composition of coal and ash. *Analytics*. 2022; 12 (6): 410-419. (In Russ.). https://doi.org/10.22184/2227-572X.2022.12.6.410.419.
9. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 1948; 27: 379-423, 623-656.
10. Lopez-Ruiz R., Mancini H.L., Calbet X. A statistical measure of complexity. *Physics Letters A*. 1995; 209 (5-6): 321-326.
11. Brazhe A.R. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns. *Physical Review E.* 2018; 97 (6): 061301. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.061301.
12. Ribeiro H.V., Zunino L., Lenzi E.K., Santoro P.A., Mendes R.S. Complexity-entropy causality plane as a complexity measure for two-dimensional patterns. *PLoS ONE*. 2012; 7 (8): e40689. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040689.

13. Moore T.A. Coalbed methane: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2012; 101: 36-81. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.05.011.
14. Коровушкин В.В., Эпштейн С.А., Дуров Н.М., Добрякова Н.Н. Минеральные и валентные формы железа и их влияние на окисление и самовозгорание углей. *Горный журнал*. 2015; (11): 66-70. https://doi.org/10.17580/gzh.2015.11.14.
Korovushkin V.V., Epshtein S.A., Durov N.M., Dobryakova N.N. Mineral and valence forms of iron and their influence on coal oxidation and spontaneous combustion. *Gornyi Zhurnal*. 2015; (11): 66-70. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2015.11.14.
15. Zhang X., Liu Y., Zhou T., Cai Y., Zhang B. Molecular simulation study on the effect of co-associated minerals on methane adsorption and mechanical properties of coal. *Applied Sciences*. 2023; 13 (24): 12975. https://doi.org/10.3390/app132412975.
16. Zou G., She J., Peng S., Yin Q., Liu H., Che Y. Two-dimensional SEM image-based analysis of coal porosity and its pore structure. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2020; 7: 350-361. https://doi.org/10.1007/s40789-020-00301-8.
17. Fang J., Li Q., Yin T., Cai Y. Investigation on the nanopore heterogeneity in coals and its influence on methane adsorption: A multifractal theory study. *ACS Omega*. 2024; 9 (17): 19504-19516. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01040.
18. Wang Z., Li Z., Zhang S., Zhang X. Microstructure changes induced by adsorption/desorption of low rank coals and its desorption hysteresis mechanism. *Fuel*. 2024; 357: 129804. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129804.
19. Liu H., Liu J., Gao D., Fan Z., Xu H., Ding H., Fang H., Zhang K. New insight into CH_4 adsorption mechanism in coal based on modeling analysis of different adsorption theories. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024; 12 (4): 113174. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113174.
20. Yang W., Wang Y., Yan F., Si G., Lin B. Evolution characteristics of coal microstructure and its influence on methane adsorption capacity under high temperature pyrolysis. *Energy*. 2022; 254: 124262. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124262.
21. Забурдяев В.С. Выделение метана из отбитого в очистном забое угля. *Безопасность труда в промышленности*. 2019; (11): 13-17. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
Zaburdiaev V.S. Methane release from broken coal in a mining face. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019; (11): 13-17. (In Russ.). https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
22. Малашкина В.А. Направления снижения эмиссии шахтного метана в атмосферу. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; (10-1): 137-145. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_101_0_137.
Malashkina V.A. Trends toward reduction of mine methane emission in atmosphere. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021; (10-1): 137-145. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_101_0_137.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иван Николаевич Горшенков –
аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: gorshenkov.in@mail.ru; SPIN-код: 8372-8732

Борис Николаевич Пашичев –
научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: borisnik-pa@yandex.ru; SPIN-код: 9007-1431

Екатерина Васильевна Ульянова –
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru;
SPIN-код: 4126-3612

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе в работу.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 24.09.2026
Поступила после рецензирования: 30.09.2026
Принята к публикации: 07.10.2026

ABOUT THE AUTHORS

Ivan N. Gorshenkov –
Postgraduate Student, Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: gorshenkov.in@mail.ru; SPIN-code: 8372-8732

Boris N. Pashichev –
Researcher, Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
e-mail: borisnik-pa@yandex.ru; SPIN-code: 9007-1431

Ekaterina V. Ulyanova –
Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru;
SPIN-code: 4126-3612

Contribution:
The authors declare the equal contribution to the work in the article.

Conflicts of Interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 24.09.2026
Revised: 30.09.2026
Accepted: 07.10.2026

Журнал включен в перечень ВАК по специальностям:

1.6.21. Геоэкология (технические науки),
2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки),
2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки)
2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки), 2.8.8. Геотехнология, горные машины (технические науки),
2.8.9. Обогащение полезных ископаемых (технические науки).

NEDRA 4.0

8-9 февраля 2027 | САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КОНГРЕСС ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ: NEDRA 4.0

130+ КОМПАНИЙ | **300+** УЧАСТНИКОВ | **40+** ДОКЛАДЧИКОВ | **40+** СТЕНДОВ | **100+** VIP-ВСТРЕЧ

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ ПРОГРАММЫ

- Технологические вызовы и возможности отрасли
- Отечественные решени для горной промышленности
- Безаварийное производство и надежность
- Автоматизация и цифровизация процессов добычи, обогащения и металлургии
- Повышение операционной эффективности
- Технологии будущего в реальных кейсах

АУДИТОРИЯ КОНГРЕСССА

- Компании полного цикла
- Горнодобывающие компании
- ГОКи
- Металлургические комбинаты
- Научные и проектные институты
- Производители оборудования
- Сервисные и IT-компании
- Гос. структуры и профильные объединения

СРЕДИ УЧАСТНИКОВ NEDRA 4.0

АЛРОСА — Официальный партнер Конгресса

Русская медная компания — Партнер Конгресса

ПОЛИМЕТАЛЛ — Партнер Конгресса

УРАЛХИМ, УРАЛКАЛИЙ

ЭН+

ЯКУТ ЗОЛОТО

0+

ПРИСОЕДИНЯЙТЕСЬ К ГЛАВНОМУ СОБЫТИЮ ОТРАСЛИ

+7 (495) 198 63 40

nedra4@sbproect.ru

СБ ПРОЕКТ



18-19 МАРТА

г. Новый Уренгой

ВЫСТАВКА «ГАЗ. НЕФТЬ. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – КРАЙНЕМУ СЕВЕРУ»

в рамках

ЯМАЛЬСКОГО НЕФТЕГАЗОВОГО ФОРУМА

SIBExpoSERVICE

ООО «Выставочная компания Сибэкспосервис», г. Новосибирск

Тел.: +7 (383) 335-63-50, e-mail: vkses@yandex.ru, www.ses.net.ru

0+



2027