

0+

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

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 25, № 6, НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 2025 г.

Vol. 25, № 6, NOVEMBER–DECEMBER 2025

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

www.n-gn.ru

Умение принимать вызовы
сегодняшнего дня, высокий
профессионализм
коллектива и обоснованная
опора на уникальный
научный опыт – основа
успешной работы НВК
«Горгеомех»



НАУЧНО-ВНЕДРЕНЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ

*Дорогие коллеги, авторы, рецензенты,
читатели журнала
«Маркшейдерия и недропользование»!*

Подводя итоги уходящего 2025 года, хочется прежде всего сказать спасибо каждому, кто формирует интеллектуальное и профессиональное пространство нашего издания. Благодаря вашим исследованиям, идеям и критическому взгляду наш журнал остается надежной площадкой для обмена научным опытом, включенной в мировое информационное поле и заслуженно входящей в перечень журналов, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

В этом году мы опубликовали свыше 70 статей, охватывающих широкий спектр проблем: от цифровых двойников горнотехнических систем до геоэкологических аспектов недропользования и сквозных BIM-решений в маркшейдерском обеспечении. География авторов и читателей расширилась до 13 стран на 5 частях света, а индекс цитирования вырос на 10 процентов. Это результат совместной работы исследователей, инженеров, редакторов и рецензентов, объединенных стремлением искать новые решения для горной науки и практики.

2025 год принес отрасли серьезные вызовы: увеличение глубины добычи полезных ископаемых, необходимость адаптации к углеродным ограничениям, ускоренная роботизация горных работ. Наши публикации демонстрируют способность научного сообщества к своевременным и профессиональным ответам на эти вызовы. Системно развивая теорию проектирования горнотехнических систем, предлагая модели безопасной совместной работы человека и машины, создавая алгоритмы управления ресурсами, основанные на принципах замкнутого цикла, авторы исследований вносят значительный научный и практический вклад в решение фундаментальных проблем в области наук о земле.

Не менее ценно, что в издании звучат голоса молодых ученых. Мы гордимся тем, что магистранты и аспиранты представляют на страницах нашего журнала результаты первых серьезных исследований наравне с признанными учеными. Уверен, что диалог между поколениями научного мира придает нашей дисциплине дополнительную динамику, а свежий взгляд молодых исследователей помогает смелее формулировать гипотезы и быстрее внедрять инновации в производство.

Дорогие друзья! В канун наступающего 2026 года желаю вам вдохновения, научной дерзости и инженерной точности. Пусть каждый поход в рудник или лабораторию, каждый расчет, каждый абзац рукописи приближает нас к главной цели – рациональному и безопасному освоению недр в интересах настоящего и будущих поколений. Пусть исследования будут финансируемы, эксперименты – успешны, дискуссии – конструктивны, а результаты – востребованы мировой профессиональной общественностью.

От имени редакционной коллегии благодарю вас за доверие, сотрудничество и поддержку. Мы открыты к новым идеям и точкам зрения, в наступающем году сделаем все, чтобы ваш научный труд был услышан, понят и оценен по достоинству.

Счастья, здоровья и благополучия вам и вашим близким! С наступающим Новым годом и Рождеством!

С искренним уважением,
главный редактор журнала
«Маркшейдерия и недропользование»,
профессор, доктор технических наук
Юрий Витальевич Дмитрак

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Научно-технический и производственный журнал



Т. 25, № 6

НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 2025 г.

Журнал издается с 2001 года

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 ВИНТИ 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: 29.12.2025

ISSN 2079-3332



24 003



© ООО «Издательский дом «Недропользование и горные науки», 2025

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

Д. Р. Каплунов – член-корр. РАН, д.т.н., проф., научный руководитель отдела «Теория проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр», 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. Ключев – 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. Рыспапов – 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. 25, № 6

NOVEMBER–DECEMBER 2025

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: 29.12.2025

ISSN 2079-3332



24 003



9 772079 333778



© Publishing House Minerals Management and Mining Sciences, LLC, 2025

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
David R. Kaplunov - Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, 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 Marmitogorsk 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. Tylenov - 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. Vujčić - 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 Mining 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. Khreshok - 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

Интервью с Александром Викторовичем Гришиным
Генеральным директором компании
ООО НВК «Горгеомех»

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ

Б. В. Хохлов, М. Д. Рожко

Применение камерной системы отработки угля в
условиях обводнения пород приповерхностной зоны

А. А. Корякин

Параметры гидромеханизированной технологии
разработки и перемещения хвостов обогащения из
шламохранилищ углеобогащительных фабрик
с применением гидроэлеваторных земснарядов

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Д. И. Блохин

Инфракрасная диагностика геомеханических процессов
в горных выработках, обусловленных природными и
техногенными факторами

Л. Лу

Механизм разрушения и контроль устойчивости
автомобильных дорог в сложных геологических условиях

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

А. А. Аврейцевич, В. А. Иодис

Влияние ультразвуковой обработки рудной пульпы
с частотой 22 кГц на рост кинетики бактериально-
химических процессов

*В. И. Голик, В. Х. Дзапаров, С. Г. Страданченко,
Ю. В. Дмитрак, С. А. Масленников*

К условиям применения выщелачивания металлов

Г. М. Дубов, А. Г. Кульпин,

А. В. Черниченко, С. А. Нохрин

Способ модернизации карьерного самосвала
«Белаз-75306» для работы в газодизельном режиме

С. А. Масленников, С. Г. Страданченко, В. И. Голик

Модель выщелачивания металлосодержащего сырья с
механохимической активацией

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В. С. Поплавский

Влияние волатильности цен на нефть на стратегию
освоения трудноизвлекаемых запасов в России

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

*В. В. Арно, Е. П. Колесниченко, И. Ю. Гарифулина,
И. Д. Долбин*

Анализ и моделирование влияния климатических
изменений на территории Северо-Востока России на
стабильность и деформацию геодезических сетей и
инженерных сооружений

INTERVIEW

Interview with Alexander Viktorovich Grishin,
CEO of NVK Gorgeomekh LLC

GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES

B. V. Khokhlov, M. D. Rozhko

Application of a chamber coal mining system in conditions
of watering of the surface zone rocks

A. A. Koryakin

Parameters of hydromechanized technology for the
development and movement of tailings from sludge
impounds of coal processing plants using hydroelevator
dredgers

GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION

D. I. Blokhin

Infrared diagnostics of geomechanical processes in mining
workings caused by natural and man-made factors

L. Lu

Failure mechanism and stability control of roadways under
challenging geological conditions

MINERAL PROCESSING

A. A. Avreitsevich, V. A. Iodis

The effect of ultrasonic treatment of ore pulp at 22 kHz on
the increase in the kinetics of bacterial-chemical processes

*V. I. Golik, V. Kh. Dzaparov, S. G. Stradanchenko,
Yu. V. Dmitrak, S. A. Maslennikov*

To the conditions of application of metal leaching

G. M. Dubov, A. G. Kulpin,

A. V. Chernichenko, S. A. Nokhrin

Method for modernization the Belaz-75306 mining dump
truck for operation in gas-diesel mode

S. A. Maslennikov, S. G. Stradanchenko, V. I. Golik

A model of leaching of metal-containing raw materials with
mechanochemical activation

GEOLOGY, EXPLORATION, AND EXPLOITATION OF OIL AND GAS FIELDS

V. S. Poplavsky

The impact of oil price volatility on the development of hard-
to-recover reserves in Russia

SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS

*V. V. Arno, E. P. Kolesnichenko, I. Yu. Garifulina,
I. D. Dolbin*

Analysis and modeling of the impact of climate change in
the North-East Russia on the stability and deformation of
geodetic networks and engineering structures

<i>В. В. Арно, Е. П. Колесниченко, И. Ю. Гарифулина, Н. Е. Ломакина, П. Е. Шаров</i>		<i>V. V. Arno, E. P. Kolesnichenko, I. Yu. Garifulina, N. E. Lomakina, P. E. Sharov</i>	
Применение вибрационных технологических датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере месторождения Наталка)	78	Application of vibration technology sensors for monitoring deformations and displacements of rock mass in open-pipe mining of deposits (on the example of the Natalka deposit)	
<i>Ф. М. Голубев, К. В. Репина</i>		<i>F. M. Golubev, K. V. Repina</i>	
Особенности влияния многократной подработки на продолжительность процесса сдвижения земной поверхности	84	Features of the influence of multiple part-time work on the duration of the earth's surface displacement process	
<i>В. В. Мусихин, Н. А. Анохин, Д. Х. Гилязов</i>		<i>V. V. Musikhin, N. A. Anokhin, D. Kh. Gilyazev</i>	
Восстановление информации об оседаниях массива налегающей толщи и земной поверхности по результатам измерений на развивающемся полигоне Яковлевского месторождения	90	Reconstruction of subsidence data for the overlying rock mass and ground surface from measurements on an evolving monitoring network at the Yakovlevskoye deposit	

ОСНОВЫ УСПЕШНОЙ РАБОТЫ КОМПАНИИ «ГОРГЕОМЕХ»

Калий – один из важных элементов, обеспечивающих жизнь на планете, а калийные удобрения – важная составляющая развития современного сельского хозяйства. Нарастание мощностей по производству калийных удобрений весьма актуально в настоящее время, в том числе в связи с ростом численности населения планеты, что в свою очередь выводит необходимость по увеличению мощности добычи калийных солей в разряд стратегически важных государственных задач. Поэтому гость нашей сегодняшней беседы генеральный директор НВК «Горгеомех», доцент кандидат технических наук Александр Викторович Гришин, деятельность компании которого тесно связана с решением ряда вопросов по обеспечению безопасного и эффективного освоения месторождений калийных солей.



■ Насколько давно ваша компания находится на поле решения вопросов по обеспечению эффективной и безопасной разработки калийных месторождений? ■

– Компания занимается вопросами повышения безопасности и эффективности разработки калийных месторождений с момента ее основания, то есть уже более 12 лет. Основной вектор работ связан с геомеханическим обеспечением разработки калийных месторождений. Выбор этого направления обусловлен тем, что в компании работают специалисты с большим опытом работ в этой области знаний. Некоторые из специалистов посвятили этому всю профессиональную жизнь. К тому же у нас в стране реализуются крупные проекты по освоению новых месторождений, включая такой уникальный проект, как строительство Гремячинского ГОКа. Перед производством с момента начала реализации проектов возникают неординарные задачи, требующие профессионального подхода к их решению, основанного на опыте работы в такой специфической отрасли, как добыча калийных солей.

■ Какие интересные задачи приходилось решать вашим специалистам, выполняя работы для предприятий по добыче калийных солей? ■

– Для нас все задачи являются интересными, если они направлены на снижение рисков возникновения опасных геомеханических процессов и повышение извлечения полезного ископаемого из недр. Но хотелось бы выделить несколько реализованных проектов, которые мы считаем наиболее значимыми.

Первый – реализация способа разработки калийного пласта, расположенного на большой глубине залегания, бо-



лее тысячи метров, направленного на безопасное извлечение полезного ископаемого при минимальных его потерях в целиках. Этот способ был разработан под руководством академика К. Н. Трубецкого и моего научного руководителя профессора М. А. Иофиса с участием специалистов нашей компании в стенах ИПКОН РАН. Предложенный подход позволил начать разработку Гремячинского месторождения на больших глубинах залегания продуктивного пласта и сохранить уровень потерь, который сформировался при разработке аналогичных месторождений на глубинах 300–400 метров.

Второй проект – предложен способ ликвидации контрольно-стволовой скважины, вышедшей за пределы контура ствола во время строительства рудника. Данный способ позволил реализовать дальнейшее строительство рудника и его последующую эксплуатацию.

Третий – методика маркшейдерских подземных геомеханических наблюдений. Впервые такие наблюдения начали реализовываться на больших площадях выработанного пространства на регулярной основе.

■ В чем особенности предложенного вами подхода по изменению параметров камерно-столбовой системы разработки с целью эффективного и безопасного ее применения на глубоких горизонтах при освоении калийных месторождений? ■



– Особенность состоит в том, что для снижения нагрузок на междуканальные целики в условиях больших глубин необходимо не допускать полной подработки массива. Тогда нагрузка на целик будет передаваться не от всей толщи вышеразположенных пород (до земной поверхности), а лишь от той ее части, которая ограничена сводом равновесия. Это обеспечивается за счет оставления опорных целиков.

■ И еще вопрос в развитие предыдущего: а для чего нужны опорные целики между разрабатываемыми блоками? ■

– За счет оставления так называемых опорных целиков между отработываемыми блоками достигается отсутствие полной подработки. Параметры опорных целиков рассчитываются на восприятие нагрузки от веса вышележащих горных пород от кровли отработываемого пласта до земной поверхности, причем с некоторым запасом, зависящим от величины опорного давления, оказываемого на рассматриваемый целик. Таким образом, за счет введения опорных целиков в камерную систему отработки образуется своеобразный «каркас», воспринимающий на себя нагрузку вышележащей толщи пород и разделяющий шахтное поле на участки с неполной подработкой. В пределах таких участков параметры междуканальных целиков рассчитываются не на весь «столб» пород, а только на его часть, ограниченную сводом равновесия.

■ Охарактеризуйте основную задачу. Посредством чего вы ее решаете, изменяя параметры камерной системы разработки при ее применении на глубоких горизонтах при освоении калийных месторождений? ■

– Основной задачей при реализации камерной системы разработки калийных пластов является поддержание вышележащей водозащитной толщи пород и недопущение в ней деформаций, способных вызвать образование водопроводящих трещин, что может привести к затоплению рудника. При использовании камерной системы разработки соляных пластов основным критерием эффективности и безопасности освоения месторождения является правильный выбор разме-



ров целиков и потолочин камер. Так, если размеры оставляемых целиков будут завышены, по сравнению с необходимыми для обеспечения заданной устойчивости выработок, это повлечет за собой необоснованное увеличение потерь полезного ископаемого и, как следствие, снижение эффективности разработки месторождения. Оставляемые целики меньшего размера, чем это требуется для поддержания вышележащей толщи пород, могут привести к преждевременному их разрушению и увеличению риска возникновения аварийной ситуации и даже полной потере рудника.

■ Скажите: почему вы считаете необходимым уделять внимание освоению периферийных площадей месторождений



калийно-магниевых солей, в частности Верхнекамского месторождения? Актуальна такая задача сегодня? ■

– Периферийные, краевые участки калийных месторождений всегда являлись сложными с точки зрения геологического строения, это связано с особенностью их формирования в геологические эпохи. Поэтому, отработка таких участков усложняется за счет отличия геомеханических процессов, развивающихся в массиве, от аналогичных, возникающих при отработке центральных участков месторождения. Еще хотелось отметить, что понятие «большая глубина разработки» не следует относить к абсолютной величине, скорее, это относительное понятие и она зависит от сложности горно-геологических условий месторождения, подлежащего освоению. Например, периферийные участки Верхнекамского месторождения вполне можно отнести к «большой глубине» разработки. Несмотря на то обстоятельство, что глубина залегания периферийных участков Верхнекамского месторождения существенно меньше уже упомянутого Гремячинского месторождения, но по характеру развития геомеханических процессов, на рассматриваемых участках Верхнекамского месторождения, вполне можно отнести к глубоко залегающим участкам месторождения.

■ Как вы относитесь к мнению некоторых специалистов, что любой калийный рудник рано или поздно будет затоплен и, соответственно, разрушен несмотря на предпринимаемые усилия по обеспечению его сохранения? ■

– История освоения калийных месторождений действительно свидетельствует о том, что в мире было затоплено порядка 70 рудников. Как показывает практика горного дела, если в калийный рудник начала поступать вода с поверхности, то такой рудник обречен на затопление, вопрос только во времени.

Но говорить о том, что рудник заранее обречен на затопление, – это, наверное, заблаговременно расписываться



в непрофессионализме. Мое мнение более оптимистично: если на руднике работают профессионалы, знающие, что такое калийные месторождения, умеющие работать с калием, своевременно реализуется геомеханическое сопровождение, проводятся научные исследования, проверяются проектные параметры на соответствие фактическим горно-геологическим условиям, то такой рудник может послужить и после извлечения полезного ископаемого.

■ В научных работах вы досконально анализируете причины аварий на месторождениях калийно-магниевых солей. Возможно ли существование системной ошибки при эксплуатации калийно-магниевых месторождений, где произошли аварии, или каждый отдельно взятый случай уникален и не встраивается в общую систему по анализу аварийной ситуации? ■

– Я так понял: речь идет об аварийных случаях, произошедших на Верхнекамском месторождении? Если так, то во всех трех причинах возникновения аварийной геомеханической ситуации не последнюю роль играет выбор параметров целиков, предназначенных для поддержания в безопасном со-



стоянии пород водозащитной толщи и их соответствия фактическому горно-геологическому состоянию массива пород.

■ Какую роль в аварийной геомеханической ситуации играет выбор параметров целиков, предназначенных для поддержания безопасного состояния пород водозащитной толщи? Что вы, как руководитель компании, можете предложить для решения данного вопроса со стороны своей команды специалистов? ■

— Хотелось бы отметить, что проектные значения параметров системы разработки не всегда соответствуют фактическим горно-геологическим условиям. В реальных условиях нагрузка на целики может быть больше или, наоборот, параметры целиков могут оказаться завышенными по сравнению с фактической нагрузкой. Для проверки расчетных параметров системы разработки и их соответствия фактическим горно-геологическим условиям необходимо проводить визуальные и инструментальные наблюдения за развитием геомеханических процессов. При необходимости провести корректировку расчетных параметров.

■ С вашей точки зрения, какие особенности массива горных пород не позволяют применять известные методики расчета без их адаптации к конкретным условиям при освоении месторождений калийно-магниевого солей? ■

— Большинство известных методик расчета создано для условий относительно неглубокого залегания продуктивного пласта, до глубин 500 метров. Для условий разработки глубоко залегающих пластов, конечно, такие методики не подойдут и потребуются их пересмотр. Так что к таким особенностям можно отнести глубину залегания продуктивного пласта. Еще можно отметить наличие мелкой слоистости, повышенное содержание глины, невыдержанное залегание пласта (складчатость). Все это необходимо учитывать при расчетах параметров системы разработки.

■ Каким предприятиям предназначены решения, выполненные вашей организацией для эффективного освоения калийно-магневых месторождений? ■

— Наша компания сотрудничает и поддерживает профессиональные контакты со всеми недропользователями, осуществляющими разработку калийных месторождений у нас в стране. Прежде всего хотелось отметить компанию «ЕвроХим», это Гремячинский ГОК, Усольский ГОК, «Уралкалий», Верхнекамскую калийную компанию, «К-Поташ».

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

— Я надеюсь: такая задача у нас еще впереди.

■ В научных публикациях вы часто ссылаетесь на труды и практические исследования профессора М. А. Иофиса. В этой связи скажите: какие наиболее значимые результаты его научных исследований стали опорными для развития и практических решений вашей компании? ■

— Михаил Абрамович Иофис — это мой учитель, я благодарен судьбе, что мне довелось трудиться вместе с Михаилом Абрамовичем. Мы проработали вместе почти 20 лет. Конечно, он огромную роль сыграл в моем становлении как специалиста и становлении НВК «Горгеомех», выступая



главным научным консультантом Компании. Больше того, могу сказать, что многие идеи, которые мы продумывали и обсуждали с Михаилом Абрамовичем, находят воплощение в современных работах. Не преувеличивая, Михаил Абрамович является основателем научной школы инженерной геомеханики, и он всегда с нами рядом, особенно в решении сложных геомеханических задач.

■ Ваша компания является опытной командой по решению вопросов эффективного освоения месторождений калийных солей. Опыт распространяется только на Россию? ■

— Нет, мы не ограничиваем работу территориальными рамками. Например, сейчас выполняем работы по геомеханическому обеспечению освоения участков Тубегатанского месторождения, которое расположено в приграничье Узбекистана и Туркменистана.

■ И в заключение нашей беседы представляется интересным узнать, как вы видите перспективы освоения месторождений калийных солей в нашей стране и мире? ■

— Я вижу большие перспективы в наращивании производства калийных удобрений в связи с бурным ростом численности населения Земли. Перспективы освоения новых месторождений — в том числе в более сложных условиях. Поэтому востребованность в решениях сложных задач, направленных на повышение безопасности и эффективности ведения горных работ на таких предприятиях, будет сохраняться и даже нарастать.

Беседовала канд. техн. наук, ученый секретарь журнала
«Маркшейдерия и недропользование»
Наталья МИЛЕТЕНКО

Применение камерной системы отработки угля в условиях обводнения пород приповерхностной зоны

Б. В. Хохлов, М. Д. Рожко✉

ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, Российская Федерация

✉ mdr6464@mail.ru

Резюме. На примере отработки 1-бис западной лавы пласта l_7 -Давыдовского шахты «Полтавская-Комсомольская № 1» описан выбор параметров камерной системы отработки запасов для условий приповерхностной зоны, осложненной неустойчивыми породами и обводнением массива. Рассмотрена возможность применения данной системы в качестве меры охраны подрабатываемых объектов поверхности.

Ключевые слова: камерная система, приповерхностная зона, обводнение массива, пустоты, устойчивость массива, обрушение, зона выветривания, ложная кровля, система разработки

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования выполнены в рамках работы FRSR-2023-0006 «Исследование устойчивости и трансформации напряженно-деформированного состояния обводненных массивов горных пород».

Для цитирования: Хохлов Б.В., Рожко М.Д. Применение камерной системы отработки угля в условиях обводнения пород приповерхностной зоны. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):9-14. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-9-14>.

Application of a chamber coal mining system in conditions of watering of the surface zone rocks

B. V. Khokhlov, M. D. Rozhko✉

Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, Russian Federation

✉ mdr6464@mail.ru

Abstract. Using the example of the 1st “bis” western lava of the l_7 -Davydovsky seam at the Poltavskaya-Komsomolskaya No. 1 mine, the article describes the selection of parameters for the chamber system of reserves extraction for the conditions of the near-surface zone, which is complicated by unstable rocks and water flooding of the massif. The possibility of using this system as a measure to protect the surface objects being undermined is considered.

Keywords: chamber system, near-surface zone, massif waterlogging, voids, massif stability, collapse, weathering zone, false roof, mining system

Acknowledgments, funding, financial Support: The research was carried out within the framework of FRSR-2023-0006 Study of stability and transformation of the stress-strain state of flooded rock mass.

For citation: Khokhlov B.V., Rozhko M.D. Application of a chamber coal mining system in conditions of watering of the surface zone rocks. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):9-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-9-14>.

Введение

Выемка угля в приповерхностной зоне, для которой характерно наличие выветрелых и обводненных пород, затруднена многими факторами, наиболее значимым из которых является процесс провалообразования. Порода над

пустотами, образованными в результате выемки угля, обрушивается, что влечет за собой возникновение провалов на земной поверхности. Вследствие внезапности возникновения они представляют основную опасность для зданий и сооружений [1–4]. Ключевой задачей в горной науке является обеспечение

безопасности ведения горных работ при одновременном поддержании эффективности и рентабельности разработки. Особенно данная проблема актуальна для месторождений, находящихся в сложных горно-геологических условиях [5, 6].

Одним из способов защиты зданий и сооружений от негативного влияния горных работ является рациональное расположение и изменение параметров выработок. В 2005–2006 годах по рекомендациям РАНИМИ в приповерхностной зоне была отработана 1-бис западная лава пласта I_7 -Давыдовский шахты «Полтавская-Комсомольская № 1». В зоне влияния оказались автодорога и водовод. При отработке запасов была применена камерная система разработки.

В России камерная система применяется на некоторых шахтах на участках с ограниченными запасами и сложными горно-геологическими условиями [7–12]. Сущность этой системы разработки заключается в том, что выемку полезного ископаемого ведут в длинных узких выработках (камерах), проводимых от главных (панельных) штреков до границ блока или панели. При проходке камер формируются целики, которые гасятся обратным ходом. Параметры панели, целиков и камер определяются исходя из конкретных горно-геологи-

ческих условий. В 2025 году был выполнен комплекс экспериментальных и модельных исследований по калибровке ранее полученных характеристик и параметров геомеханических процессов, протекающих в обводненных горных массивах, где использовались результаты работы прошлых лет.

Цель исследований: выбор системы разработки и ее оптимальных параметров для обеспечения устойчивости массива и охраны объектов поверхности.

Объект исследований

Особенности геологического и гидрогеологического строения участка

Данный участок расположен на небольшой глубине, в среднем 35–40 м. В геологическом отношении он занимает центральную (замковую) часть Чистяковской синклинали, где в ее строении принимают участие осадочные породы среднего отдела карбона, представленные свитой C_2^6 – «Алмазная».

Каменноугольные отложения почти повсеместно перекрыты более поздними четвертичными отложениями (почвенно-растительный слой, а ниже – желто-бурые лёссовидные суглинки с известковыми включениями) мощностью от 2 до 5 м (рис. 1, 2).

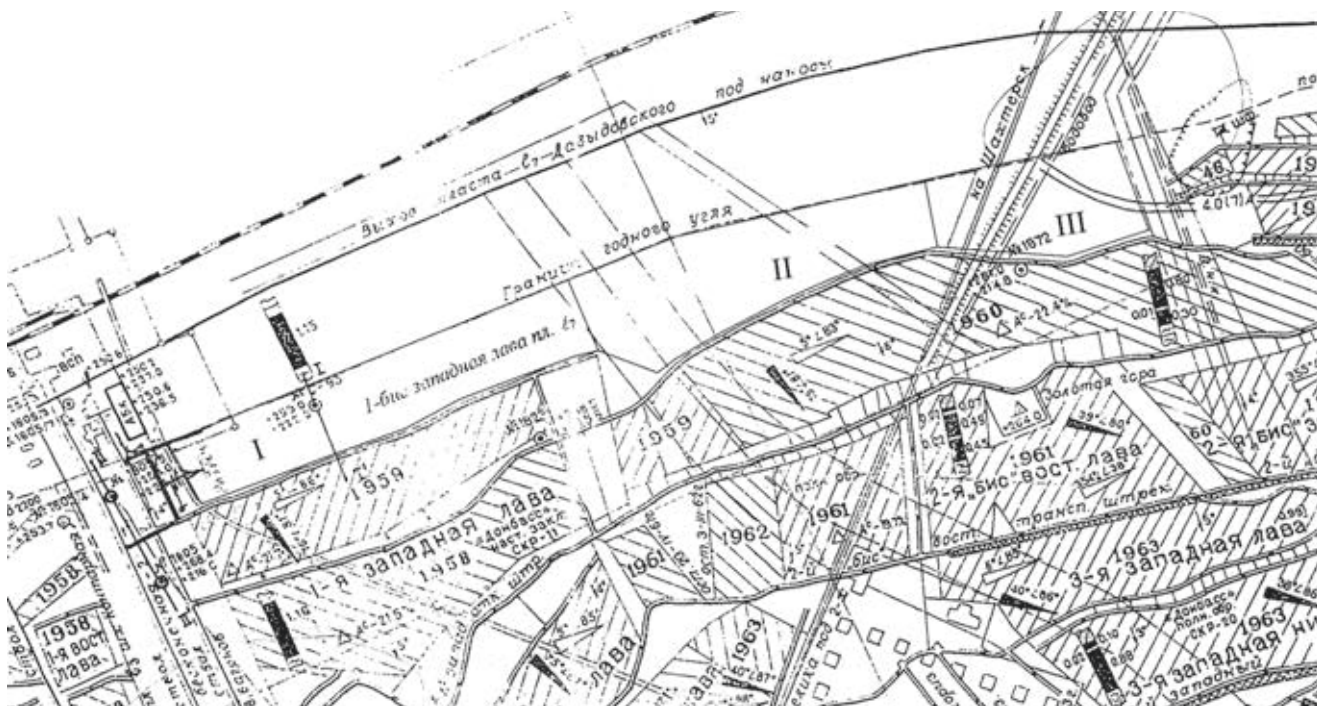


Рис. 1. Фрагмент плана горных выработок пласта I_7 / Fig. 1. Fragment of the mining workings plan of seam I_7

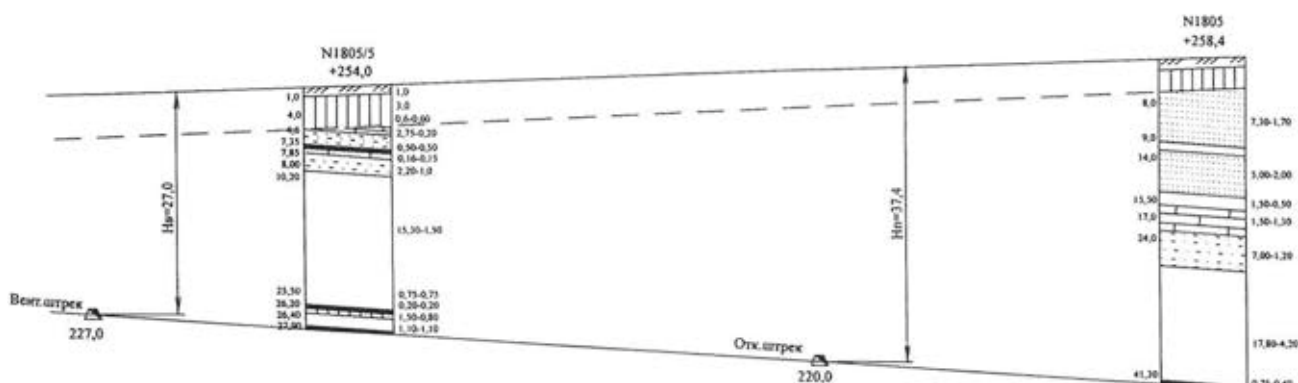


Рис. 2. Фрагмент геологического разреза по скважинам № 1805/5 и 1805 / Fig. 2. Fragment of the geological section for wells No. 1805/5 and 1805

Простиране пород – северо-западное, падение – северо-восточное под углом 4–5°. Общий уклон поверхности – с севера на юг. На участке крупных тектонических нарушений не выявлено, имеются мелкие локальные размывы пласта, и в 450 м от вспомогательного наклонного ствола отмечается смещение пласта I_7 -Давыдовский на высоту 1,8 м.

Пласт – у осевой части Чистяковской синклинали, характеризуется сложной гипсометрией (изменение элементов залегания, обратное падение).

Условия отработки пласта I_7 , а также условия поддержания очистных и подготовительных горных выработок – сложные, что обусловлено наличием в зоне I (рис. 1) ложной и неустойчивой кровли, а также локальных размывов пласта. Толща горных пород на большей части участка представлена слабыми неустойчивыми породами, ранее подработанными горными работами шахты «Контарная». Осложняющим фактором является также расположение участков горных работ в зоне выветривания.

В связи с тем, что пласт I_7 подработан очистными работами бывшей шахты «Контарная», вода из него дренирует и попадает в водосборники горизонта пласта I_3 шахты «Винницкая». Из-за небольшой глубины возможно поступление в шахту поверхностных вод и возникновение крупных трещин.

На поверхности планируемого к отработке участка (рис. 1) имеется автодорога пос. Стожковское – г. Шахтерск, асфальтированная, двухрядная 6,0 (12) А, и водовод пластиковый ПНД диаметром 200 мм, уложенный в песок. Эти объекты находятся в конце выемочного поля над зоной III (рис. 1), где породы кровли являются наиболее устойчивыми. При применении камерной системы отработки запасов влияние подработки на них будет незначительным.

Методика исследований

При ведении горных работ на малых глубинах существенную опасность представляет возможность образования провалов земной поверхности над горными выработками. Это может происходить в любой период эксплуатации шахты под влиянием обрушения покрывающих пород и активизироваться при наличии ослабленных водонасыщенных пород [13–16].

Над очистными выработками при разработке пологих пластов провалы не образуются при условии, регламентируемом ГСТУ 101.00159226.001-2003. «Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом»:

$$H_b \geq 20 m,$$

где H_b = 29,5 м – глубина верхней границы выработки, m = 1,15 м – вынимаемая мощность пласта. $29,5 \geq 20 \cdot 1,15 = 23$ м. Следовательно, над очистной выработкой провалы образовываться не будут.

В то же время над конвейерным штреком провалы возможны, так как на пологих пластах образуются при условии

$$H_k < 15h_b \cdot k_n,$$

где H_k – расстояние по вертикали от кровли выработки до контакта коренных пород с наносами, м; k_n – коэффициент,

зависящий от строения и крепости пород, $k_n = 1,2$; $h_b = 2,5$ м – высота выработки.

Для условий 1-бис западной лавы: $H_k = 15 \cdot 2,5 \cdot 1,2 = 45$ м.

Угольные пласты на неглубоких горизонтах под действием различных физико-химических факторов изменяют качественные показатели, окислению подвергаются и вмещающие породы, которые приобретают трещиноватость, рыхлость, слабость и неустойчивость. С глубиной степень окисления уменьшается, и породы сохраняют свойственную им устойчивость [17–20].

Выемка угля производится на небольшой глубине, в приповерхностной зоне, поэтому данные о фактических физико-механических свойствах угля и вмещающих горных пород были уточнены путем исследования проб из непосредственной и основной кровли пласта I_7 .

Результаты исследований и их обсуждение

На основе многофакторного анализа условий отработки угля, а также результатов исследований разных лет установлено, что на данном участке рационально применение камерной системы отработки запасов.

Ложная кровля на отрабатываемом участке осложняет крепление выработок. В некоторых случаях невозможно поддерживать такую кровлю. Таким образом, ложная кровля ограничивает выбор типа крепи. Так, крепи с прямолинейным верхняком эффективны только при наличии достаточно устойчивого плоского обнажения кровли в забое. При наличии же неустойчивой кровли, а также неконтролируемых вывалов породы применение таких крепей нецелесообразно. Если же мощность неустойчивой пачки непосредственной кровли невелика, то применение крепей с прямолинейным верхняком возможно при условии полного извлечения пачки непосредственной кровли. В этом случае прямолинейный верхняк устанавливается под устойчивое плоское обнажение вышележащей пачки.

Общее подвигание фронта работ – от границы к наклонным стволам с последовательным погашением отработанной камеры и соответствующего участка штрека.

Граничным значением подвигания камеры является условие, когда вывалы пород кровли приобретают систематический характер, что служит сигналом остановки забоя.

Рекомендуемая плотность установки крепежных рам по восстановлению равна 1,25 рам/пог. м (шаг установки – 0,8 м), на осложненных участках – 2 рамы/пог. м (шаг установки – 0,5 м).

Расчет устойчивости межкамерных целиков выполнен в соответствии с [21–23] с учетом ложной кровли для каждой из трех зон (рис. 1). В результате определены допустимые размеры целиков:

- зона I – 3,0–3,8 м;
- зона II – не менее 2,8 м;
- зона III – не менее 2,5 м.

Заключение

1. Участок шахты «Полтавская – Комсомольская №1», на котором по пласту I_7 -Давыдовский производится выемка угля, расположен в зоне выветрелых обводненных пород, что значительно усложняет процесс добычи угля.

К осложняющим отработку также относятся следующие факторы:

– наличие ослабленных пород;
 – небольшая глубина горных работ (в среднем 25–30 м);
 – обводненность угля и вмещающих пород, которые обусловлены притоком поверхностных вод, особенно в межсезонье.

2. Рассматриваемые условия выемки угля не охватываются действующими нормативными документами в части выбора системы разработки, типа и параметров крепления.

3. Приведенные выше особенности на практике означают, что принимаемые технические решения имеют индивидуальный, нестандартный характер, а также накладывают ряд ограничений прежде всего при выборе общей схемы и порядка отработки, типа крепи, параметров ее установки, средств и способа охраны.

4. В данных условиях сделан вывод о необходимости использования камерной системы разработки, что главным образом обусловлено наличием неустойчивой кровли.

5. Оработка запасов в приповерхностной зоне ведется по восстановлению камерами, длина которых зависит от устойчивости нижней пачки непосредственной кровли, допускающей установку верхняка под плоское обнажение (значительные неконтролируемые вывалы пород).

Параметры системы разработки в соответствии с проведенными расчетами [20–23] следующие:

Ширина камер – до 5 м.

Ширина целиков между камерами – от 2,5 до 3,8 м на различных участках в соответствии с проведенными расчетами

[23], а также КД 12.01.01.503-2001¹ и «Инструкцией по выбору рамных податливых крепей»².

Плотность установки крепи – 1,25 рамы/пог. м, на осложненных участках – 2 рамы/пог. м.

Конвейерный штрек под участком водовода и дорогой Стожково – Шахтерск полностью закладывается породой без извлечения крепи.

6. Камерная система отработки в России распространена на участках добычи, где выемка длинными столбами нерентабельна. Специалисты РАНИМИ предлагают использовать камерную систему разработки с оптимальными параметрами, разработанными РАНИМИ, на небольших глубинах в условиях выветрелых и обводненных пород в качестве меры охраны подрабатываемых объектов поверхности. Данный вывод подкреплен результатами инструментальных наблюдений за состоянием водовода и автомобильной дороги.

¹ КД 12.01.01.503-2001 Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35°. Руководство / ДонУГИ. Минтопэнерго Украины. Киев, 2002.

KD 12.01.01.503-2001 Roof management and support in mining faces on coal seams with a dip angle of up to 35°. Manual DonUGI. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Kiev, 2002 (In Russ.).

² Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. Издание 2-е, перераб. и дополн. / Минуглепром СССР: Утв. 30.04.91. Разраб. ВНИМИ. Санкт-Петербург, 1991. 126 с. Instructions for selecting frame flexible supports for mine workings. Second edition, revised and expanded / Minugleprom USSR: Approved on 30.04.91. Developed. VNIMI. St. Petersburg, 1991: 126. (In Russ.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Казанин О.И., Мустафин М.Г., Мешков А.А. Анализ причин провалов земной поверхности при отработке угольного пласта Байкамский на шахте «Красноярская» «ОАО СУЭК – КузБАСС». *ГИАБ*. 2013: 257-261
Kazanin O.I., Mustafin M.G., Meshkov A.A. Analysis of the Causes of Ground Surface Failures during the Development of the Baikamsky Coal Layer at the Krasnoyarskaya Mine of OAO SUEK-KuzBASS. *GIAB*. 2013: 257-261. (In Russ.).
2. Хохлов Б.В., Рожко М.Д. Апробация нового подхода к прогнозу провалообразования в приповерхностной зоне обводненных массивов. *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы 6-й конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого, посвященная 300-летию Российской академии наук, Москва, 17–21 июня 2024 г.* Москва, 2024: 52-55
Khokhlov B.V., Rozhko M.D. Testing a new approach to predicting sinkhole formation in the near-surface zone of water-saturated massifs. *Problems and Prospects of Comprehensive Development and Preservation of the Earth's Subsoil: Proceedings of the 6th Conference of the international scientific school of Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Trubetskoy, dedicated to the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences, Moscow, June 17-21, 2024.* Moscow, 2024: 52-55. (In Russ.).
3. Барях А.А., Девятков С.Ю. Геомеханическая оценка условий образования провалов на земной поверхности на участке прорыва пресных вод в калийный рудник. *Горный журнал*. 2018; 6: 17-21.
Baryakh A.A., Devyatkov S.Yu. Geomechanical Assessment of the Conditions for the Formation of Dips on the Earth's Surface at the Site of Freshwater Breakthrough into a Potassium Mine. *Mining Journal*. 2018; 6: 17-21. (In Russ.).
4. Бажутин П.И., Щербakov С.В. Определение возможных сценариев провалообразования и прогнозирование диаметра карстовых провалов. *Инженерная геология*. 2024; XIX (2): 6-16.
Bazhutin P.I., Shcherbakov S.V. Identification of possible sinkhole formation scenarios and prediction of the diameter of karst sinkholes. *Engineering Geology*. 2024; XIX (2): 6-16. (In Russ.).
5. Yang H., Kim W., Ali M. Performance of pillar design in underground stone mines that include discontinuities. *Geosystem Engineering*. 2012; 15 (3): 187-194. <https://doi.org/10.1080/12269328.2012.704160>.
6. Zhang W., Kong X., Kang T., et al. Research on reasonable size of large coal pillar between panels at mining face with soft surrounding rock. *Min. Res. Dev.* 2013; 33: 14-17.
7. Филатов Ю.М., Семенцов В.В., Прокопенко С.А. и др. Повышение эффективности и безопасности отработки целиков при камерно-столбовой системе отработки угольных пластов. *Уголь*. 2018; 12: 16-20.
Filatov Yu. M., Semyontsov V.V., Prokopenko S.A., et al. Improving the efficiency and safety of pillar mining in the chamber-pillar system of coal seam mining. *Coal*. 2018; 12: 16-20. (In Russ.).
8. Шухлин В.А. Обоснование параметров камерно-столбовой системы разработки при отработке пологопадающих угольных пластов. *Записки горного института*. 2009; 181: 55-57.
Shukhlin V.A. Substantiation of parameters of the chamber-pillar system of development during the mining of gently sloping coal seams. *Notes of the Mining Institute*. 2009; 181: 55-57. (In Russ.).
9. Харисов Т.Ф., Харисова О.Д. Геомеханическое обоснование параметров устойчивых камер и целиков в сложных горно-геологических условиях. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019; 330 (7): 25-33.

- Kharisov T.F., Kharisova O.D. Geomechanical substantiation of parameters of stable chambers and pillars in difficult mining and geological conditions. *News of Tomsk Politekhnic University. Inzhiniring georesursov*. 2019; 330 (7): 25-33 (In Russ.).
10. Nomikos P.P., Sofianos A.I. An analytical probability distribution for the factor of safety in underground rock mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2011; 48 (4): 597-605. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.02.015>.
 11. Семенов В.В., Осминин Д.В., Добровольский М.С. и др. Исследование технологии безопасной отработки угля при камерно-столбовой системе в зарубежных шахтах. *Вестник НЦ ВостНИИ*. 2019; 4: 35-56.
Sementsov V.V., Osminin D.V., Dobrovolsky M.S., et al. Research of the Technology of Safe Coal Mining under the Chamber-pillar System in Foreign Mines. *Bulletin of the Scientific Center of VostNI*. 2019; 4: 35-56. (In Russ.).
 12. Семенов В.В., Добровольский М.С., Нифанов Е.В. и др. Исследование технологии безопасной отработки угля при камерно-столбовой системе в российских шахтах: Обзор. *Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2018; 4: 5-23.
Sementsov V.V., Dobrovolsky M.S., Nifanov E.V., et al. Research of the Technology of Safe Coal Mining under the Chamber-pillar System in Russian Mines. Review. *Bulletin of the Research Center for Industrial and Environmental Safety*. 2018; 4: 5-23 (In Russ.).
 13. Минь Ч. Т. Влияние подземных вод на устойчивость приповерхностных выработок. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021; 1: 195-207.
Min Ch. T. Influence of Underground Pits on the Stability of Near-Surface Mines. *News of Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 1: 195-207. (In Russ.).
 14. Звягильский Е.Л., Минаев А.А., Назимко В.В. и др. Геомеханические основы предотвращения провалов земной поверхности при ликвидации шахт. Донецк, 2001: 334.
Zvyagilsky E.L., Minaev A.A., Nazimko V.V., et al. Geomechanical Foundations of Preventing Earth Surface Failures during Mine Liquidation. Donetsk, 2001: 334 (In Russ.).
 15. Karfakis M. G., Topuz E. Post mining subsidence abatements in Wyoming abandoned coal mines. *Mining Science and Technology*. 1991; 12: 215-231.
 16. Хохлов Б.В., Дрибан В.А., Голдин С.В. и др. Методика построения и обследования зон, опасных по провалам. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр.* Донецк, 2019; 7 (22): 142-157.
Khokhlov B.V., Driban V.A., Goldin S.V., et al. Methodology for Constructing and Surveying Areas at Risk of Failure. *Proceedings of the Russian Academy of Natural Sciences and Mineral Resources: Collection of Scientific Papers*. Donetsk, 2019; 7 (22): 142-157. (In Russ.).
 17. Hawkes C.D. Assessing the mechanical stability of horizontal boreholes in coal. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011; 44 (7): 797-813. <https://doi.org/10.1139/t07-021>.
 18. Дмитрак Ю.В., Голик В.И., Венигор В.В. Геомеханические предпосылки сохранения устойчивости выработок при разработке водообильных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018; 1: 221-226.
Dmitrak Yu.V., Golik V.I., Venigor V.V. Geomechanical prerequisites for maintaining the stability of workings during the development of water-rich deposits. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2018; 1: 221-226 (In Russ.).
 19. Терлецкий А.М., Рожко М.Д. Изменение упругих характеристик горных пород при затоплении горных выработок. *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых; под. ред. акад. К.Н. Трубецкого*. Москва, 2019: 82-85.
Terletsky A.M., Rozhko M.D. Changes in the elastic characteristics of rocks during flooding of mine workings. *Problems of subsoil development in the XXI century through the eyes of the young; ed. Academician K.N. Trubetskoy*. Moscow, 2019: 82-85. (In Russ.).
 20. Ревва В.Н., Васютин В.В., Крижановская Л.Н. Критерий развития трещин в твердых телах. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр.* Донецк, 2023; 20-21 (35-36): 112-118.
Revva V.N., Vasyutina V.V., Krizhanovskaya L.D. The criterion of the development of cracks in solid bodies. *Proceedings of the RANIMI: collection of scientific papers*. Donetsk, 2023; 20-21 (35-36): 112-118 (In Russ.).
 21. Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Южанин И.А., и др. Расположение, охрана и поддержание горных выработок на угольных шахтах Донецкого бассейна. Донецк, 2021: 266.
Driban V.A., Khokhlov B.V., Yuzhanin I.A., et al. Location, protection, and maintenance of mine workings in coal mines of the Donetsk basin. Donetsk, 2021: 266. (In Russ.).
 22. Дрибан В.А. Определение оптимальных параметров камерной отработки угольных пластов. *Проблемы горного давления*. 2001; 5: 90-107.
Driban V.A. Determination of the optimal parameters of chamber mining of coal seams. *Problems of rock pressure*. 2001; 5: 90-107. (In Russ.).
 23. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С. и др. Теория защитных пластов. Москва, 1976: 223.
Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S., et al. Theory of Protective Layers. Moscow, 1976: 223. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Борис Валентинович Хохлов –
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, заведующий отделом
горного давления, ФГБНУ «Республиканский
академический научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и
маркшейдерского дела», г. Донецк, Российская
Федерация; e-mail: hbv@bk.ru

Boris V. Khokhlov –
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of
Rock Pressure Department, Republican Academic
R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Mine Surveying (RANIMI),
Donetsk, Russian Federation; e-mail: hbv@bk.ru



Марина Дмитриевна Рожко –
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник отдела горного давления,
ФГБНУ «Республиканский академический
научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт горной геологии,
геомеханики, геофизики и маркшейдерского
дела», г. Донецк, Российская Федерация; e-mail:
mdr6464@mail.ru

Marina D. Rozhko –
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the
Department of Mining Pressure, Republican
Academic R&D Institute of Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying
(RANIMI), Donetsk, Russian Federation; e-mail:
mdr6464@mail.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: 10.10.2025

Поступила после рецензирования: 24.11.2025

Принята к публикации: 26.11.2025

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: 10.10.2025

Revised: 24.11.2025

Accepted: 26.11.2025

Параметры гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов

А. А. Корякин✉

ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу»,

г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ rtn-kaa@mail.ru

Резюме. Представлены результаты исследований параметров гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогачительных фабрик Кузбасса с применением гидроэлеваторных земснарядов. Решен ряд задач, среди которых разработка методического подхода к обоснованию параметров технологии очистки шламохранилищ гидроэлеваторным земснарядом УГБ-2М, позволяющим учитывать влияния горнотехнических условий на его производительность, в том числе от расстояния транспортирования гидросмеси и геодезической высоты ее подъема при различных диаметрах пульповода трубопровода для гидросмеси; создание новой технологии очистки шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда, определены условия ее функционирования и параметры в зависимости от физико-механических свойств хвостов углеобогащения; блок-схемы алгоритма расчета параметров системы гидротранспорта и оптимизации ее параметров с учетом горнотехнических условий эксплуатации. Также определены параметры новой технологии очистки шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда для горнотехнических условий шламохранилища ОФ «Черниговская», определены ее основные технико-экономические показатели и даны рекомендации по совершенствованию работы водошламового комплекса гидротехнических сооружений ОФ «Черниговская».

Ключевые слова: разработка угольных шламов, перемещения хвостов обогащения, гидроэлеваторный земснаряд УГБ-2М, алгоритм расчета параметров, производительность, горнотехнические условия

Для цитирования: Корякин А.А. Параметры гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):15-25. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-15-25>.

Parameters of hydromechanized technology for the development and movement of tailings from sludge impounds of coal processing plants using hydroelevator dredgers

A. A. Koryakin✉

Federal Budgetary Institution "Territorial Fund of Geological Information for the Siberian Federal District",

Novosibirsk, Russian Federation

✉ rtn-kaa@mail.ru

Abstract. This article presents the results of a study of the parameters of a hydromechanized technology for the development and movement of tailings from sludge storage ponds at Kuzbass coal preparation plants using hydroelevator dredgers. The study addresses a number of issues: a methodological approach has been developed to substantiate the parameters of the UGB-2M hydroelevator dredger cleaning sludge storage ponds. This approach takes into account the influence of mining conditions on its performance, including the distance the slurry is transported and the geodetic height of its lifting for various slurry pipeline diameters; a new technology for cleaning sludge storage ponds at coal preparation plants using a hydroelevator dredger has been developed. Its

operating conditions and parameters have been determined based on the physical and mechanical properties of the coal preparation tailings; a flowchart of an algorithm for calculating the parameters of the hydrotransport system and optimizing its parameters, taking into account mining operating conditions. Also defined the parameters of a new technology for cleaning sludge storage facilities of coal preparation plants using a hydraulic elevator dredger for the mining and technical conditions of the sludge storage facility of the Chernigovskaya processing plant were determined, its main technical and economic indicators were determined and recommendations were given for improving the operation of the water-sludge complex of the hydraulic structures of the Chernigovskaya processing plant.

Keywords: development of coal slurries, movement of enrichment tailings, hydraulic elevator dredger UGB-2M, algorithm for calculating parameters, productivity, mining conditions

For citation: Koryakin A.A. Parameters of hydromechanized technology for the development and movement of tailings from sludge impounds of coal processing plants using hydroelevator dredgers. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):15-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-15-25>.

Введение

Основная нагрузка по добыче угля в РФ приходится на Кемеровскую область, доля которой составляет 48 % от всего угля, добываемого в России. Особое внимание потребители уделяют качеству угля, что определило интенсивное строительство обогатительных фабрик в Кузбассе, в перспективе переработка угля будет развиваться опережающими темпами [1–5]. Стоит отметить, что в шламохранилища Кузбасса уложено более 30 млн т отходов углеобогащения. Они загрязняют окружающую среду, занимают большие территории и рано или поздно после их заполнения шлам придется утилизировать [6–8].

В этой связи исследования по обоснованию технологии и оборудования для безопасной и эффективной разработки угольных шламов, намытых ранее в шламохранилище, должны базироваться на передовом опыте разработки и перемещения неконсолидированных пород способом гидромеханизации [9–12].

Анализ технологии и оборудования, которые применяются для разработки шламов из шламохранилищ углеобогажительных фабрик, показал, что они не соответствуют свойствам разрабатываемых пород и малоэффективны. Следовательно, обоснование технологии и технических средств для разработки шламов с целью их утилизации или захоронения является актуальной научно-практической задачей. В связи с тем что основой применяемых технологий является гидромеханизация, причем ее работа, учитывая климатические условия, является сезонной, а процесс углеобогащения круглогодичным, главным элементом шламового хозяйства является шламохранилище. В нем накапливаются хвосты обогащения за весь холодный период года, а в летний сезон он средствами гидромеханизации перемещается на карты фильтрации и утилизируется.

В настоящее время из-за невыполнения в первую очередь вышеуказанного условия площадь шламохранилищ практически достигла критических, по экологическим понятиям, значений. Изучив опыт применения гидромеханизации, которая в Кузбассе хорошо зарекомендовала себя при проведении гидровскрышных работ, можно сказать, что научных рекомендаций по эффективной и безопасной гидромеханизированной технологии очистки шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда выявить не удалось. Специалистам известно, что намытые или сильно обводненные породы должны разрабатываться землесосным снарядом, который для большей эффективности может оснащаться специальными средствами:

гидрорыхлителем, фрезами и др. Применять землесосные снаряды при открытой добыче угля, к сожалению, непринято, учитывая сравнительно высокие затраты на их приобретение и сезонность работ.

Появились публикации о разработке обводненных запасов песчаногравийных месторождений строительных материалов на карьере Тучковского комбината строительных материалов (ТКСМ), где успешно эксплуатировался гидроэлеваторный земснаряд УГБ-2М [13, 14]. Такие земснаряды для разработки грунтов применялись еще во время строительства ряда Волжских гидротехнических сооружений [15]. Самостоятельное использование водоструйных насосов сдерживалось из-за их ограниченных возможностей. В первую очередь это сравнительно небольшие расстояния транспортирования, а также невысокий коэффициента полезного действия. На карьере ТКСМ не требовался существенный геодезический подъем и перемещение гидросмеси на значительное расстояние. Как правило, карта намыва строительных материалов находилась в пределах 300 м от забоя земснаряда, а величина геодезической высоты подъема гидросмеси не превышала 5 м.

Опубликованные данные по фактической (статистической) производительности гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М в условиях карьера ТКСМ показали, что при длине пульповода 250 м его производительность по твердому изменялась в диапазоне 17300–18090 м³ в месяц, а при увеличении дальности до 300 м сокращалась до величины 14100–15200 м³ [16].

Цель исследований: обоснование параметров гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов.

Объект исследований: шламохранилища углеобогажительных фабрик Кузбасса.

Идея работы заключается в том, что безопасная технология разработки и перемещения хвостов обогащения из шламонакопителей углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов для их утилизации или захоронения может быть эффективно реализована путем выбора их параметров, которые соответствуют горнотехническим условиям эксплуатации с учетом физико-механических свойств разрабатываемых шламов.

Предмет исследования: параметры технологии и возможности технических средств гидромеханизированной разработки шламохранилища углеобогажительных фабрик при их работе в различных горнотехнических условиях.

Методы исследований

В работе использован комплексный методический подход, включающий обобщение сведений, содержащихся в научно-технической и специальной литературе, и анализ результатов, выполненных ранее теоретических и экспериментальных работ по современным способам обустройства шламохранилищ углеобогажительных фабрик и применению гидромеханизированных технологий при открытой добыче полезных ископаемых; методы прикладной математики и математической статистики; технико-экономический анализ с использованием стоимостных параметров.

Полученные результаты и их обсуждение

На основании анализа взаимосвязи критериев горнотехнических условий и основных факторов процессов технологии очистки шламохранилищ с применением эжекторного земснаряда был разработан методологический подход к определению условий, обеспечивающих устойчивую и безопасную работу гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения (рис. 1).

С целью обоснования возможности применения гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М для переукладки шламов при разработке хвостов обогащения для очистки шламонакопителей обогажительных фабрик были произведены расчеты параметров гидротранспорта при различных значениях расстояния транспортирования и геодезической высоты подъема гидросмеси и его производительность с использованием соответствующих методик [17–21].

Установлено, что условиями, обеспечивающими устойчивую и безопасную работу гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения, являются:

1. Величина действительной скорости перемещения пульпы в трубопроводе V_d должна быть больше либо равна величине критической скорости $V_{кр}$. Это условие исключает

заиливание (закупорку пульповода), возможность гидравлического удара и аварии, а также учитывает физико-механические свойства гидросмеси хвостов.

2. Величина подачи гидротранспортной установки должна определяться по месту пересечения характеристики пульповода, построенного для определенного расстояния перемещения и геодезической высоты подъема пульпы, с технической характеристикой земснаряда (графоаналитический способ определения совокупности «рабочих точек»). Это условие позволяет учитывать горнотехнические условия работы оборудования и границы его технического использования, что гарантирует устойчивую работу комплекса.

На основании методологического подхода, включающего вышеперечисленные условия, был разработан алгоритм определения величины фактической подачи гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения с учетом физико-механических свойств гидросмеси хвостов для различных расстояний перемещения пульпы и геодезической высоты ее подъема (рис. 2).

В результате расчета по алгоритму для условий ОФ «Черниговская» была установлена совокупность значений фактической подачи земснаряда УГБ-2М при очистке шламохранилища, что позволило установить все технически возможные значения его производительности по твердому (шламу) при разных диаметрах пульповода (0,30; 0,35; 0,40; 0,45 м) и расстояния транспортирования гидросмеси от 300 до 2000 м при геодезической высоте подъема пульпы от 0 до 20 м. При этом производительность по твердому (шламу) находилась в пределах зоны технического использования и изменялась от 38,0 до 97,0 м³/ч [22].

Зона технического использования гидроэлеваторных земснарядов УГБ-2М приведена на рисунке 3.

Таким образом, разработан методологический подход



Рис. 1. Схема взаимосвязи критериев горнотехнических условий и основных факторов технологических процессов технологии очистки шламохранилищ с применением эжекторного земснаряда /

Fig. 1. Diagram of the relationship between the criteria of mining conditions and the main factors of technological processes of the technology for cleaning sludge storage facilities using an ejector dredger

к определению условий, обеспечивающих устойчивую и безопасную работу гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения. На первом этапе определена величина значений диаметра пульпопровода, соответствующая условию: действительная скорость движения гидросмеси V_d должна быть больше или равной критической $V_{кр}$, что учитывает физико-механические свойства гидросмеси хвостов и исключает закупорку (заиливание) трубопровода. А на втором этапе для различных расстояний перемещения пульпы и геодезической высоты ее подъема рассчитывается соответствующая величина производительности гидротранспортной установки, что позволило установить

диапазон ее изменения в пределах зоны технического использования [22, 23].

Известно, что расчет параметров гидротранспорта является довольно сложной задачей. Поэтому для применения в производственных условиях и оценки перспектив изменения параметров гидрокомплекса в проекте, выполненном специалистами-проектировщиками, предлагаются установленные в работе эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать производительность гидроэлеваторных земснарядов УГБ-2М в границах зоны его технического использования при различных диаметрах пульпопровода с учетом физико-механических свойств хвостов углеобогащения и горнотехнических условий.

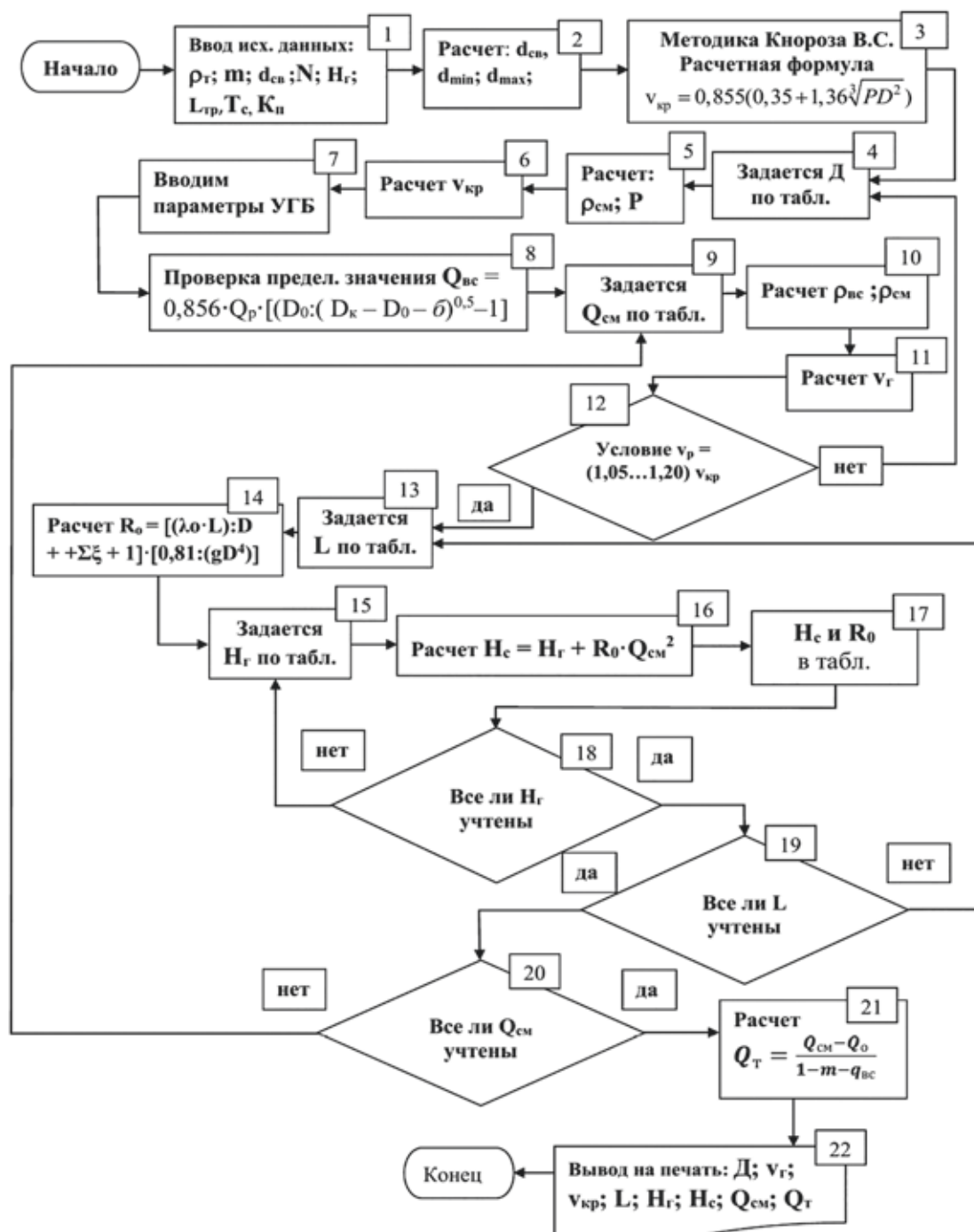


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета параметров системы гидротранспорта технологии очистки шламохранилищ углеобогажительных фабрик

с применением гидроэлеваторных земснарядов и его производительности в зависимости от горнотехнических условий работы /
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for calculating the parameters of the hydraulic transport system for cleaning the sludge storage facilities of coal preparation plants using hydraulic elevator dredgers and its productivity depending on the mining and technical conditions of its operation

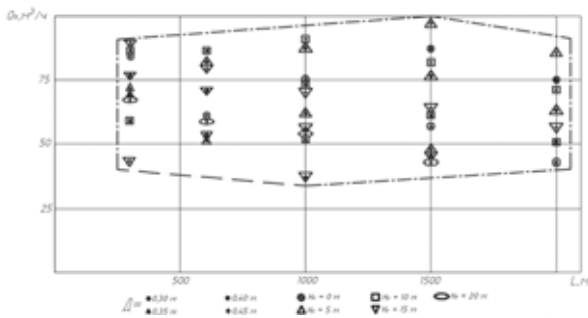


Рис. 3. Диапазон промышленного использования земснаряда УГБ-2М /
Fig. 3. Range of industrial use of the UGB-2M dredger

Построив графики зависимостей изменения производительности земснаряда для каждого из технически возможных диаметров пульповода (от $D = 0,30$ до $0,45$ м), которые приведены на рисунке 4, замечаем характерные особенности их изменения.

Прежде всего замечаем, что угол наклона графика для каждого из диаметров пульповода является постоянным. Анализ графических зависимостей изменения часовой производительности земснаряда УГБ-2М показывает, что увеличение расстояния перемещения гидросмеси шламов с $L = 300$ до 2000 м существенно уменьшает ее величину. При этом величина снижения производительности от геодезической высоты подъема гидросмеси H_r при одном и том же значении L зависит от диаметра пульповода D .

Учитывая довольно сложную методику определения часовой производительности земснаряда УГБ-2М при изменении вышеуказанных параметров L и H_r , которая включает

расчет параметров гидротранспорта и характеристики трубопровода (сети Нс), а также расчет, построение характеристики земснаряда и графоаналитический способ определения «рабочей точки», целесообразно определить упрощенную эмпирическую зависимость для ее расчета. Такая зависимость для расчета часовой производительности земснаряда по твердому (шламу) в часто изменяющихся горнотехнических условиях, например при переносе места выпуска гидросмеси при ее намыве, позволит технологам в промышленных условиях прогнозировать и принимать технические решения, учитывающие изменения горнотехнических условий функционирования предлагаемой технологии.

В результате для соответствующих значений диаметра пульповода установлены эмпирические зависимости для расчета производительности землесосного снаряда УГБ-2М в условиях по твердому:

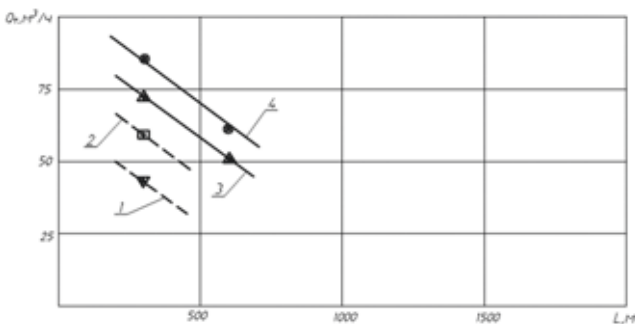
$$- \text{для } D = 0,30 \text{ м } Q_r = 108 - 2,7 \cdot H_r - 0,073 \cdot L; \quad (1)$$

$$- \text{для } D = 0,35 \text{ м } Q_r = 123 - 2,8 \cdot H_r - 0,043 \cdot L; \quad (2)$$

$$- \text{для } D = 0,40 \text{ м } Q_r = 126 - 2,6 \cdot H_r - 0,024 \cdot L; \quad (3)$$

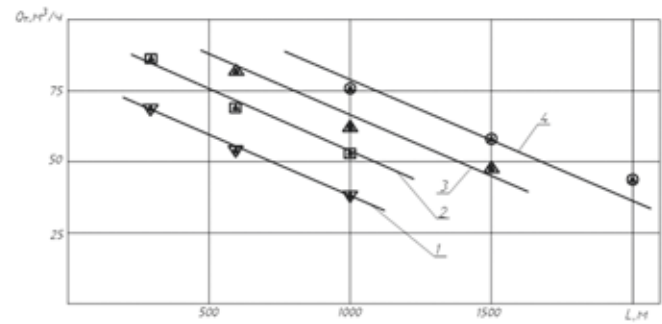
$$- \text{для } D = 0,45 \text{ м } Q_r = 139 - 3,1 \cdot H_r - 0,019 \cdot L. \quad (4)$$

Например, подставив в формулу (4) при диаметре пульповода $D = 0,45$ м значения геодезической высоты подъема гидросмеси $H_r = 5$ м и расстояние транспортирования $L = 1500$ м, можем определить величину производительности по твердому землесосного снаряда УГБ-2М в производственных условиях ОФ «Черниговской» — $Q_r = 95,0$ м³/ч.



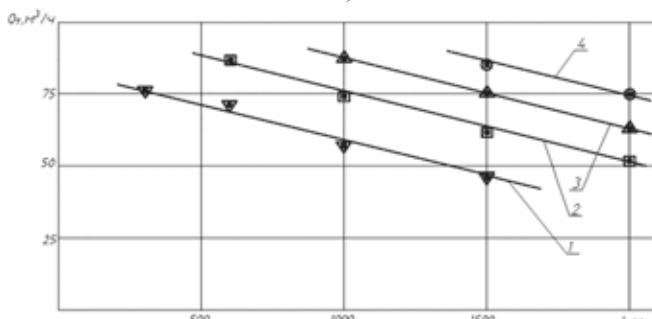
$$1 - Q_r = 65,0 - 0,073 \cdot L; \quad 2 - Q_r = 81,0 - 0,073 \cdot L; \\ 3 - Q_r = 94,5 - 0,073 \cdot L; \quad 4 - Q_r = 106,0 - 0,073 \cdot L;$$

а)



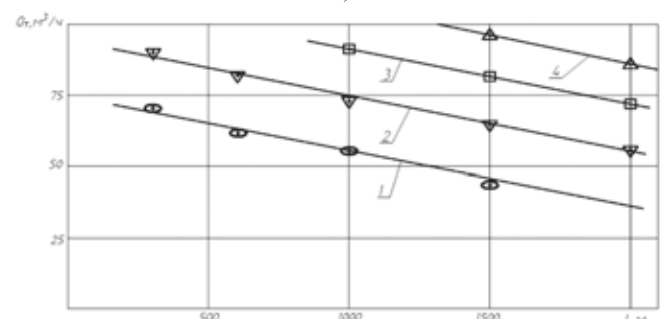
$$1 - Q_r = 81,0 - 0,043 \cdot L; \quad 2 - Q_r = 98,0 - 0,043 \cdot L; \\ 3 - Q_r = 110,0 - 0,043 \cdot L; \quad 4 - Q_r = 123,0 - 0,043 \cdot L;$$

б)



$$1 - Q_r = 84,0 - 0,024 \cdot L; \quad 2 - Q_r = 100,0 - 0,024 \cdot L; \\ 3 - Q_r = 113,0 - 0,024 \cdot L; \quad 4 - Q_r = 124,0 - 0,019 \cdot L;$$

в)



$$1 - Q_r = 74,0 - 0,019 \cdot L; \quad 2 - Q_r = 94,0 - 0,019 \cdot L; \\ 3 - Q_r = 110,0 - 0,019 \cdot L; \quad 4 - Q_r = 125,0 - 0,019 \cdot L;$$

г)

Рис. 4. Графики зависимостей изменения производительности земснаряда для каждого из технически возможных диаметров пульповода:

а — $D = 0,30$ м; б — $D = 0,35$ м; в — $D = 0,40$ м; г — $D = 0,45$ м /

Fig. 4. Graphs of the dependence of changes in the dredger productivity for each of the technically possible diameters of the slurry pipeline:

а — $D = 0,30$ м; б — $D = 0,35$ м; в — $D = 0,40$ м; г — $D = 0,45$ м

В таблице 1 приведены результаты статистической оценки достоверности результатов расчета производительности по твердому землесосному снаряду УГБ-2М для различных условий его работы (в пределах ранее установленных технических границ его применения) по упрощенным эмпирическим формулам.

Таблица 1 / Table 1

Результаты статистической оценки полученных зависимостей /
The results of the statistical evaluation of the dependencies obtained

Параметр	Диаметр пульповода Д, м			
	0,30	0,35	0,40	0,45
Среднее линейное отклонение, м ³ /ч	1,33	2,34	2,25	2,54
Относительная ошибка, %	2,42	1,93	3,59	3,84
Среднеквадратическое отклонение, %	1,97	3,32	2,94	3,24
Коэффициент вариации, %	5,80	5,37	4,17	4,43

Таким образом, статистическая оценка полученной зависимости характеризует высокую степень достоверности результатов расчета по эмпирической формуле, что значительно упростит расчеты при выборе оптимальных параметров гидрокомплекса при совместной разработке пород гидроотвалов гидромонитором и землесосным снарядом. Это значит, что для оперативного планирования на предприятиях определены эмпирические зависимости, позволяющие упростить расчет производительности гидроэлеваторных земснарядов УГБ-2М в границах зоны его технического использования для различных диаметров пульповода при изменении горно-технических условий [22, 23].

Совокупность результатов проведенных исследований позволила разработать новый способ решения задачи по повышению эффективности использования мобильных гидроэлеваторных земснарядов УГБ-2М для очистки шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, работающих на трубопровод, который попеременно используется как пульповод и водовод. Решение может быть достигнуто за счет организационно-технических мероприятий. Новая технология может быть реализована при учете ряда факторов, присущих эксплуатации оборудования гидромеханизации в совокупности с работой оборудования гидромеханизации ОФ по сбросу хвостов обогащения [24].

На рисунке 5 показана общая схема сооружений, объектов и коммуникаций шламонакопителей.

Способ осуществляют следующим образом. Гидросмесь шламов с обогатительной фабрики 1 по пульповоду 2 поступает в шламонакопитель 3. В зимний период осветленная вода через сбросной колодец 4 по трубопроводу 5 отправляется в пруд-накопитель 6, откуда насосом 7 по водоводу 8 возвращается на обогатительную фабрику 1.

В период сезона работы гидромеханизации (апрель – октябрь) в шламохранилище 3 с помощью автокрана в зону скопления осветленной воды (около водосбросного колодца 4) помещают земснаряд 9, который гибким плавучим трубопроводом 10 соединен с трубопроводом 11, по которому гидросмесь шламов перемещается в централизованный шламоотстойник 12. Когда в шламохранилище 3 возникает дефицит технологической воды, работу земснаряда останавливают, закрывают задвижки 13, 14, открывают задвижки 15, 16 и

производят запуск водяного насоса 17. В результате осветленная вода из централизованного шламоотстойника 12 по трубопроводу 11 поступает в шламохранилище 3, при этом задвижка 18 должна быть закрыта.

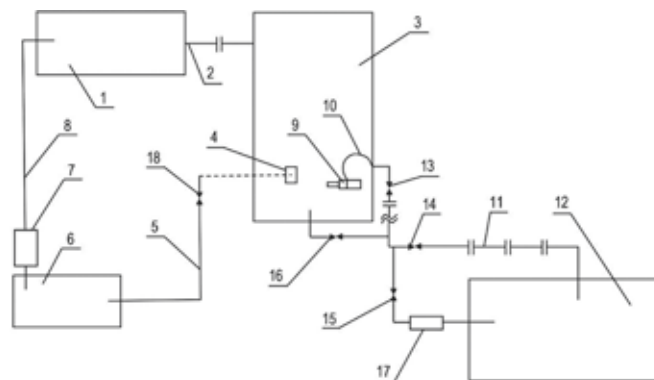


Рис. 5. Схема организации новой технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, работающих на трубопроводе, который попеременно используется как пульповод и водовод /
Fig. 5. Scheme of the organization of a new technology for the development and movement of enrichment tailings from sludge storage facilities of coal enrichment plants using hydraulic elevator dredgers operating on a pipeline that is alternately used as a slurry pipeline and a water pipeline

В результате выполнения этого способа обеспечивается очистка шламохранилища земснарядом при поочередном движении воды и гидросмеси по одной трубе, что особенно важно при значительном расстоянии до централизованного шламоотстойника и высокой стоимости металлических труб, при этом в процессе перемещения по трубопроводу воды осуществляется промывка пульповода, значительно снижающая риск его заиливания, возникновения гидравлического удара и порыва (аварии). В результате выполнения заявляемого способа происходит увеличение концентрации твердого в гидросмеси за счет того, что размыв и забор гидросмеси шламов осуществляется из подводного забоя, а не с поверхности. При этом расположение оборудования на понтоне земснаряда позволяет осуществлять его перемещения по всей территории шламохранилища и качественно очищать всю его емкость от шламов.

Предлагаемая технология подразумевает возможность обеспечения работы земснаряда в основном путем отключения системы сброса осветленной воды и создания внутри шламохранилища емкости и ее заполнения технологической водой, поступающей с обогатительной фабрики по трубопроводу вместе со шламом. В процессе намыва этой гидросмеси и осаждения твердых породных частиц вода осветляется и заполняет емкость всего шламохранилища, в том числе и уже очищенную земснарядом часть общей емкости.

Условиями функционирования нового способа очистки шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда являются следующие соотношения параметров процессов и показателей предлагаемой технологической схемы:

1. Годовой объем шлама, намытого в шламохранилище, должен быть разработан и перемещен по пульповоду на новое место земснарядом в течение одного сезона.

Математически это условие может быть записано в виде формулы

$$V_{\text{т.год}} = Q_{\text{т}} \times (T_{\text{с}} - t_{\text{в}}) \times K_3; \quad (5)$$

где $V_{\text{т.год}}$ – годовой объем шлама, намытого в шламохранилище, м^3 ;

$Q_{\text{т}}$ – производительность гидроэлеваторного земснаряда по твердому, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$T_{\text{с}}$ – продолжительность сезона гидромеханизации в регионе, ч;

$t_{\text{в}}$ – продолжительность работы системы водоснабжения за сезон, ч;

K_3 – коэффициент использования земснаряда за сезон, в долях единицы.

2. Вода, необходимая для отработки годового объема шлама, должна быть обеспечена за счет сезонного ее поступления со шламом ОФ и системы подпитки из отстойника по пульповоду земснаряда в период его технического простоя (обслуживания, профилактического ремонта и т.п.).

Это условие в виде математической формулы может быть записано:

$$V_{\text{т.год}} \times q = V_{\text{т.год}} \times (T_{\text{с}} : T_{\text{оф}}) \times q_{\text{ф}} + V_{\text{п}} - V_{\text{н}} - V_{\text{ф}} - V_{\text{зп}} + V_{\text{с}} + V_{\text{о}}, \quad (6)$$

где $q_{\text{ф}}$ – удельный расход воды в гидросмеси, поступающей с обогатительной фабрики, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

q – удельный расход воды при разработке пород земснарядом, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$T_{\text{с}}$ – продолжительность сезона гидромеханизации в регионе, ч;

$T_{\text{оф}}$ – годовой фонд рабочего времени ОФ, ч;

$V_{\text{п}}$ – величина подпитки по пульповоду земснаряда, м^3 ;

$V_{\text{н}}$ – величина потерь на испарение, м^3 ;

$V_{\text{ф}}$ – потери воды на фильтрацию, м^3 ;

$V_{\text{зп}}$ – потери воды в укладываемой породе (заполнение пор), м^3 ;

$V_{\text{с}}$ – величина поверхностного стока, м^3 ;

$V_{\text{о}}$ – остаточный запас воды к началу сезона, м^3 .

3. Требуемая величина подпитки по пульповоду земснаряда должна обеспечиваться производительностью принятого водяного насоса $Q_{\text{в}}$ (7) и возможностью прокачки по трубопроводу (8):

$$V_{\text{п}} = t_{\text{в}} \times N \times Q_{\text{в}} \times K_3; \quad (7)$$

$$Q_{\text{в}} \leq 900 \times \pi \times D^2 \times v; \quad (8)$$

где $Q_{\text{в}}$ – производительность водяного насоса системы подпитки, $\text{м}^3/\text{ч}$;

N – количество земснарядов, единицы (целочисленное значение);

K_3 – коэффициент использования оборудования системы водоснабжения за сезон, в долях единицы;

D – диаметр трубопровода (пульповода земснаряда), м;

v – скорость движения воды в трубопроводе, оптимальное значение которой обычно составляет $2 \div 2,5$ м/с.

Соблюдение всех трех условий, то есть система уравнений (9) с неизвестными: N , $t_{\text{в}}$, $V_{\text{п}}$, $Q_{\text{в}}$, определяет условия функционирования новой, предлагаемой технологии очистки шламонакопителя углеобогатительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда, который работает на трубопровод, попеременно использующийся как пульповод и водовод:

$$\begin{cases} V_{\text{т.год}} = Q_{\text{т}} \times N \times (T_{\text{с}} - t_{\text{в}}) \times K_3; \\ V_{\text{т.год}} \times q = V_{\text{т.год}} \times (T_{\text{с}} : T_{\text{оф}}) \times q_{\text{ф}} + V_{\text{п}} - V_{\text{н}} - V_{\text{ф}} - V_{\text{зп}} + V_{\text{с}} + V_{\text{о}}; \quad (9) \\ V_{\text{п}} = t_{\text{в}} \times N \times Q_{\text{в}} \times K_3; \\ Q_{\text{в}} \leq 900 \times \pi \times D^2 \times v. \end{cases}$$

Система уравнений (9) и установленные в работе зависимости позволили разработать блок-схему алгоритма оптимизации параметров технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогатительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов в зависимости от горнотехнических условий эксплуатации при различных диаметрах трубопровода для гидросмеси (рис. 6), которая является продолжением алгоритма, представленного на рисунке 2.

Обсуждение результатов исследований, предложения по практическому применению

В результате проведенных исследований определены параметры новой технологии очистки шламохранилища углеобогатительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда для горнотехнических условий шламохранилища ОФ «Черниговская» и рассчитаны ее основные технико-экономические показатели, а также разработаны рекомендации по совершенствованию работы водошламового комплекса гидротехнических сооружений ОФ «Черниговская» с применением гидроэлеваторного земснаряда.

Суть соблюдения всех трех условий функционирования предлагаемой технологии заключается в том, что продолжительность сезона гидромеханизации должна обеспечивать как разработку и удаление шламов земснарядом, так и необходимую продолжительность работы насоса, осуществляющего подпитку (компенсацию затрат воды) по пульповоду земснаряда.

Решение системы уравнений для горнотехнических условий работы гидроэлеваторного земснаряда при очистке шламохранилища ОФ «Черниговская» (принимая $D = 0,45$ м, $L = 2,0$ км, $H_{\text{г}} = 10$ м, $Q_{\text{т}} = 72,0$ $\text{м}^3/\text{ч}$) позволило установить следующие основные параметры этой технологии, которые обеспечивают баланс процессов и устойчивую безаварийную работу всего гидрокомплекса:

– продолжительность сезона гидромеханизации в регионе $T_{\text{с}} = 4032$ ч;

– производительность гидроэлеваторного земснаряда по твердому $Q_{\text{т}} = \text{м}^3/\text{ч}$;

– удельный расход воды на разработку и транспортирование шлама земснарядом составляет $q = 6,5$ $\text{м}^3/\text{м}^3$;

– удельный расход воды, поступающей с обогатительной фабрики, составляет $q_{\text{ф}} = 6,3$ $\text{м}^3/\text{м}^3$;

– максимальное значение времени на работу системы подпитки без ущерба производительности земснаряда $t_{\text{в}} = 559,778$ ч;

– величина подпитки по пульповоду земснаряда $V_{\text{п}} = 750186,84$ $\text{м}^3/\text{сезон}$;

– производительность принятого водяного насоса $Q_{\text{в}} = 1486,13$ $\text{м}^3/\text{ч}$;

– общий объем воды, который может быть подан по системе подпитки, $V_{\text{п}} = 750186,84$ $\text{м}^3/\text{сезон}$;

– объема шламов, который на протяжении года укладывается ОФ «Черниговская» в шламохранилище и должен быть

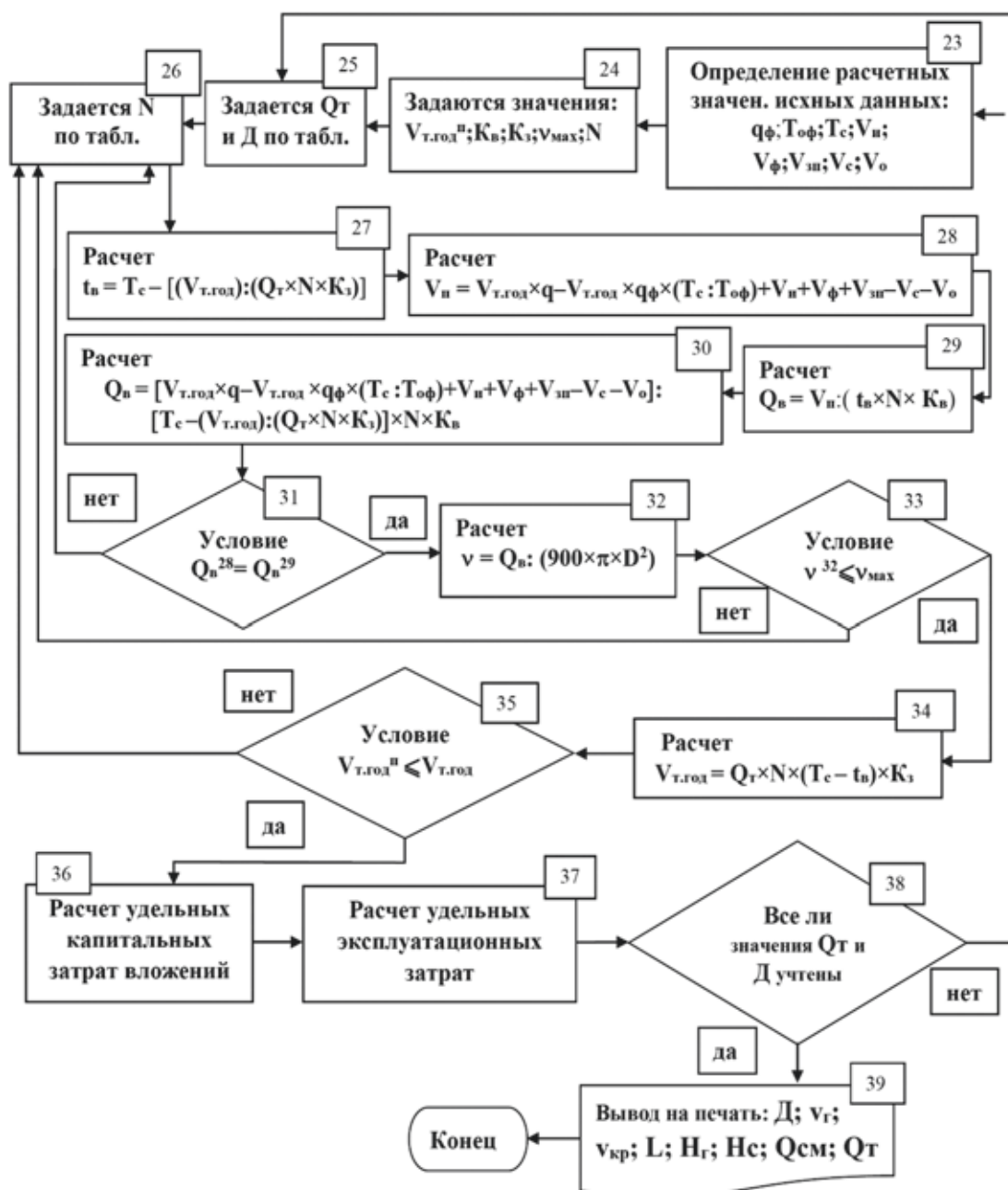


Рис. 6. Блок-схема алгоритма оптимизации параметров технологии очистки шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов /

Fig. 6. Block diagram of the algorithm for optimizing the parameters of the technology for cleaning sludge storage facilities of coal preparation plants using hydraulic elevator dredgers

разработан гидроэлеваторным земснарядом за сезон гидро-механизации, $V_{\text{т.год}} = 199987,2 \approx 200$ тыс. м³/сезон.

Таким образом, требуемая для условий ОФ «Черниговская» (производительность – 200 тыс. м³ за сезон) технология разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилища ОФ может быть реализована с применением гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М, работающего на трубопровод, который попеременно используется как пульповод и водовод. При этом обеспечивается сокращение металлоемкости на 174 тонны и исключаются затраты на монтаж и обслуживание этого трубопровода.

Следовательно, установленная система уравнений (9), определяющая условия функционирования новой технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением ги-

дроэлеваторных земснарядов, работающих на трубопровод, который попеременно используется как пульповод и водовод, гарантирует устойчивую и эффективную работу комплекса в условиях ОФ «Черниговская».

Анализируя принятую в настоящее время организацию работы водошламового хозяйства ОФ «Черниговская», отметим, что прежде всего обращает на себя внимание принципиально неправильный выбор технических средств гидро-механизации для разработки шламов, намытых (уложенных) в шламохранилище «Техническая вода». Использование гидромонитора ГМД-250 для размыва пород требует формирования уступа, который разрабатывается встречным или боковым забоем, с «подрезкой», что вызывает его обрушение и разрушение пород за счет сил гравитации. Размыв гидромонитором поверхностного слоя шламов малоэффективен.

Плотность гидросмеси, которую удастся создать при гидро-мониторном размыве забоя (по опыту разработки четвертичных вскрышных работ в Кузбассе), составляет 1,12–1,14 т/м³ (Т : Ж $\approx$ 1 : 7). Когда разработка шламов осуществляется принятым способом, соотношение Т:Ж, вероятно, составляет $\approx$ 1:15! Фактически землесос перекачивает не угле-шламовую смесь, а грязную воду, либо землесос ЗГМ-2М фактически перекачивает гидросмесь, поступающую с ОФ.

Учитывая полученные результаты исследования, возможности гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М для очистки шламохранилищ углеобогачительных фабрик, предлагается новая структура гидромеханизированного водошламового комплекса ОФ «Черниговская».

В период сезона гидромеханизации (для Кузбасса это конец апреля – начало ноября) подача шламовых вод с ОФ осуществляется не в шламохранилище «Техническая вода», а на карту № 1 шламового отстойника, которая очищена от шлама и находится в резерве (рис. 7). Там формируется емкость, из которой гидросмесь шламов может забираться землесосом ЗГМ-2М, оснащенный зумповым гидромонитором ГМД-250, главная задача которого формировать зону всоса и очищать ее при запуске осевших шламов. В эту же емкость одновременно подается гидросмесь от гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М, который располагается в шламоприемной емкости шламохранилища «Техническая вода» и производит размыв ранее уложенных шламов. Землесос ЗГМ-2М по пульповоду перекачивает угле-шламовую смесь на карты инфильтрации, расположенные на отвале Чесноковском. На них происходит обезвоживание поступающей смеси, а после заполнения карты и ее последующего осушения, выполняются работы по очистке карты от шлама, его вывозка и складирование.

В зимний период подача шламовых вод с ОФ осуществляется, как и раньше, в шламохранилище «Техническая вода».

Предлагаемая новая структура гидромеханизированного водошламового комплекса ОФ «Черниговская» с применением гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М в виде

«Рекомендаций по совершенствованию технологии очистки шламохранилищ углеобогачительной фабрики гидроэлеваторным земснарядом УГБ-2М в условиях работы водошламового комплекса гидротехнических сооружений ОФ «Черниговская» передана в проектный институт ООО «Сибгеопроект». В них представлен расчет производительности системы гидротранспортирования шламов землесосом ЗГМ-2М при одновременном поступлении гидросмеси с ОФ и от земснаряда УГБ-2М, который доказал, что предлагаемая схема позволяет не только обеспечить очистку шламохранилища в объеме годовой потребности, но обеспечит возможность очистки всего водоема «Техническая вода».

Заключение

В статье изложены научно обоснованные технические и технологические решения по обоснованию параметров гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогачительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, которая может быть эффективно реализована путем выбора их параметров, в соответствии с горнотехническими условиями эксплуатации и с учетом физико-механических свойств разрабатываемых шламов.

1. На основании анализа горнотехнических условий и организации работы водошламового хозяйства углеобогачительных фабрик Кузбасса, в соответствии с разработанным методологическим подходом, произведен расчет параметров гидротранспорта, обеспечивающих устойчивую и безопасную работу земснаряда УГБ-2М, и определен главный параметр технологии – производительность гидрокомплекса по твердому (шламу) при очистке шламохранилищ углеобогачительных фабрик для различных горнотехнических условий его эксплуатации: расстояния транспортирования гидросмеси и геодезической высоты ее подъема при различных диаметрах пульповода.

2. С целью оперативного планирования и определения производительности гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М

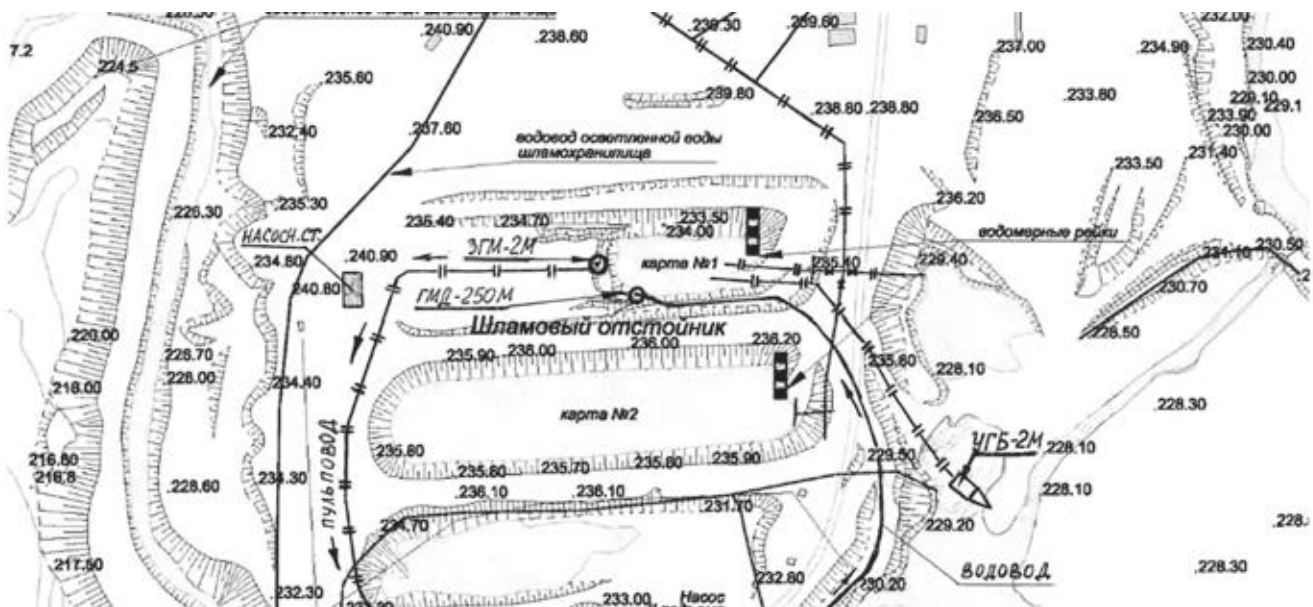


Рис. 7. Предлагаемая схема гидротранспортирования шламов землесосом ЗГМ-2М при одновременном поступлении гидросмеси с обогащательной фабрики и от земснаряда УГБ-2М /

Fig. 7. Proposed scheme for hydrotransportation of sludge by the ZGM-2M dredger with simultaneous delivery of hydraulic mixture from the OF and from the UGB-2M dredger

при очистке шламохранилища в производственных условиях определены упрощенные эмпирические зависимости для прогнозирования изменения часовой производительности земснаряда по твердому (шламу) для каждого из технически возможных диаметров пульповода при переносе места выпуска гидросмеси и изменения расстояния ее перемещения или геодезической высоты подъема.

3. Разработана новая технология перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, работающих на трубопровод, который попеременно используется как пульповод и водовод.

5. Установлена система уравнений, определяющая условия функционирования и параметры технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов в зависимости от физико-механических свойств хвостов углеобогащения.

6. Разработана блок-схема алгоритма расчета параметров системы гидротранспорта и оптимизации параметров технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов в зависимости от горнотех-

нических условий эксплуатации при различных диаметрах трубопровода для гидросмеси.

7. Рекомендации по совершенствованию работы вододшамового комплекса гидротехнических сооружений ОФ «Черниговская» с применением гидроэлеваторного земснаряда переданы в проектный институт ООО «Сибгеопроект». Годовой экономический эффект при применении для отработки хвостов ОФ «Черниговская» гидроэлеваторным земснарядом УГБ-2М составит более трех миллионов рублей в год.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований параметров процессов новой технологии очистки шламохранилищ углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторного земснаряда и условия функционирования гидрокомплекса с учетом технических характеристик принятого оборудования, горнотехнических условий эксплуатации и физико-механических свойств шламов.

2. Результаты исследований могут быть полезными в качестве рекомендаций по совершенствованию системы вододшламового комплекса гидротехнических сооружений ОФ разреза АО «Черниговец» с применением гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Суфиянов Р.Ш., Катыльмов А.В., Гольберг Г.Ю. Экологический аспект основных направлений повышения эффективности ресурсосбережения в сфере топливпереработки. *Кокс и химия*. 2010; 2: 39-43.
Sufyanov R.Sh., Katalymov A.V., Golberg G.Yu. Ecological aspect of the main directions to increase resource-saving efficiency in fuel processing. *Coke and Chemistry*. 2010; 2: 39-43. (In Russ.).
- Рашевский В. Обогащение угля – один из главных приоритетов стратегии СУЭК. *Уголь*. 2016; 8 (1085): 70.
Rashevsky V. Coal beneficiation is one of the key priorities of SUEK strategy. *Coal*. 2016; 8 (1085): 70. (In Russ.).
- Ефимова Н.В. Анализ состояния и основные тенденции добычи, обогащения и экологии потребления энергетических углей в России. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2017; 1: 83-91.
Efimova N.V. Analysis of the state and main trends in mining, beneficiation and environmental aspects of energy coal consumption in Russia. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2017; 1: 83-91. (In Russ.).
Жолобова Ю.С., Сафронов А.Е., Куший Н.А. и др. Минимизация воздействия на окружающую среду при применении новых технологий обогащения углей и утилизации отходов добычи. *Горный журнал*. 2016; 5: 109-112. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.18>.
Zholobova Yu.S., Safronov A.E., Kushchiy N.A., et al. Minimizing environmental impact when using new coal beneficiation technologies and mining-waste utilization. *Mining Journal*. 2016; 5: 109-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.18>.
- Харионовский А.А., Данилова М.Ю. О методических подходах к переходу предприятий угольной промышленности на систему нормирования сбросов загрязняющих веществ в водные объекты по технологическим показателям. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2018; 10 (130): 50-61.
Kharionovskiy A.A., Danilova M.Yu. Methodological approaches to the transition of coal-industry enterprises to a discharge-standard system based on technological indicators. *Water Purification. Water Treatment. Water Supply*. 2018; 10 (130): 50-61. (In Russ.).
- Ефимов В.И., Сидоров Р.В., Корчагина Т.В. К вопросу образования отходов производства от предприятий угольной отрасли в Кузбассе. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017; 1: 85-96.
Efimov V.I., Sidorov R.V., Korchagina T.V. On the issue of waste generation by coal-industry enterprises in Kuzbass. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 1: 85-96. (In Russ.).
- Белокопытов П.И., Сазыкин Г.П., Синецкий Б.А. Обогащение углей в Кузбассе. *ТЭК и ресурсы Кузбасса*. 2002; 4/8: 25-29.
Belokopytov P.I., Sazykin G.P., Sineckiy B.A. Coal Enrichment in the Kuzbass. *Fuel and Energy Complex and Resources of the Kuzbass*. 2002; 4/8: 25-29. (In Russ.).
- Белокопытов П.И., Сазыкин Г.П. Решение экологических проблем Кузбасса в проектах обогатительных фабрик. *ТЭК и ресурсы Кузбасса*. 2003; 4/13: 17-19.
Belokopytov P.I., Sazykin G.P. Solving environmental problems of Kuzbass in projects of beneficiation plants. *Fuel and Energy Complex and Resources of Kuzbass*. 2003; 4/13: 17-19. (In Russ.).
- Серегин А.И., Горлов Е.Г. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008; 5: 241-244.
Seregin A.I., Gorlov E.G. Development of process flowsheets for converting coal slurries into marketable products. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2008; 5: 241-244. (In Russ.).
- Горлов Е.Г., Серегин А.И., Ходаков Г.С. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива. *Химия твердого топлива*. 2007; 6: 51-57.
Gorlov E.G., Seregin A.I., Khodakov G.S. Conditions for utilizing slurries of coal-mining and coal-processing enterprises as suspension fuel. *Solid Fuel Chemistry*. 2007; 6: 51-57. (In Russ.).

11. Мосикян А.В. Признаки отнесения накопителей гетерофазных отходов к гидротехническим сооружениям. *Управление техносферой*. 2021; 4 (2): 221-228. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2021.30.58.010>.
Mosikyan A.V. Criteria for classifying storages of heterophase waste as hydraulic-engineering structures. *Technosphere Management*. 2021; 4 (2): 221-228. (In Russ.). <https://doi.org/10.34828/UdSU.2021.30.58.010>.
12. Кононенко Е.А., Белоусов К.С. Анализ работы и возможностей гидроэлеваторного земснаряда в условиях карьера Тучковского комбината строительных материалов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009; 9: 210-214.
Kononenko E.A., Belousov K.S. Analysis of performance and capabilities of a hydro-elevator dredger at the Tuchkovo Construction Materials Plant quarry. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2009; 9: 210-214. (In Russ.).
13. Бабичев Н.И., Дворовенко А.Е. Конструкция и опыт эксплуатации новых типов гидродобычных установок для разработки обводненных залежей песчано-гравийных смесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006; 4: 135-142.
Babichev N.I., Dvorenko A.E. Design and operational experience of new hydraulic-mining units for water-saturated sand-gravel deposits. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2006; 4: 135-142. (In Russ.).
14. Федотенко В.С., Корякин А.А. Перспективы применения эжекторных земснарядов для очистки шламонакопителей обогатительных фабрик. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; (9): 15-28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_15.
Fedotenko V.S., Koryakin A.A. Prospects for using ejector dredgers to clean tailings ponds of beneficiation plants. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022; (9): 15-28. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_15.
15. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы и другие струйные аппараты. Москва, 1950: 348.
Kamenev P.N. Hydroelevators and other jet devices. Moscow, 1950: 348. (In Russ.).
16. Бекренев С.В., Белоусов К.С. Тучковский комбинат строительных материалов: история, современное состояние и опыт решения производственных задач. *Горный журнал*. 2007; 1: 33-35.
Bekrenev S.V., Belousov K.S. Tuchkovo Construction Materials Plant: history, current state and experience in solving production tasks. *Mining Journal*. 2007; 1: 33-35. (In Russ.).
17. Кнороз В.С. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод расчета. *Известия ВНИИГ*. Ленинград, 1941: 256.
Knoroz V.S. Movement of hydraulic mixtures in pressure pipelines and calculation method. *News VNIIG*. Leningrad 1941: 256. (In Russ.).
18. Юфин А.П. Гидромеханизация: учебное пособие для вузов. Москва, 1974: 223.
Yufin A.P. Hydromechanization: textbook for universities. Moscow, 1974: 223. (In Russ.).
19. Гришко А.П. Стационарные машины карьеров. Москва, 1982: 224.
Grishko A.P. Stationary machines of open-pit mines. Moscow, 1982: 224. (In Russ.).
20. Коржаев С.А. Теоретические основы расчета гидроэлеваторов. *Известия АН СССР. Отделение технических наук*. 1939; 6: 31-54.
Korzhayev S.A. Theoretical foundations of hydro-elevator calculation. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical Sciences Section*. 1939; 6: 31-54. (In Russ.).
21. Коржаев С.А. Пути улучшения работы гидроэлеваторов и метод их расчета. Москва, 1961: 12.
Korzhayev S.A. Ways to improve hydro-elevator performance and their calculation method. Moscow, 1961: 12. (In Russ.).
22. Корякин А.А. Производительность эжекторного земснаряда УГБ-2м при очистке шламонакопителя обогатительной фабрики. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022; 3: 36-41.
Koryakin A.A. Productivity of the UGB-2m ejector dredger during cleaning of a beneficiation plant tailings pond. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2022; 3: 36-41. (In Russ.).
23. Федотенко В.С., Корякин А.А. Перспективы применения эжекторных земснарядов для очистки шламонакопителей обогатительных фабрик. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 9: 15-28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_15.
Fedotenko V.S., Koryakin A.A. Prospects for using ejector dredgers to clean tailings ponds of beneficiation plants. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022; 9: 15-28. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_15.
24. Корякин А.А. Обоснование параметров технологии очистки илонакопителей углеобогатительных фабрик гидроэлеваторными земснарядами. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 4: 41-46. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-41-46>.
Koryakin A.A. Substantiation of technological parameters for cleaning sludge ponds of coal-processing plants by hydro-elevator dredgers. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025; 4: 41-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-41-46>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Артём Александрович Корякин –
директор ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу», г. Новосибирск, Российская Федерация;
e-mail: rtn-kaa@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.08.2025
Поступила после рецензирования: 10.12.2025
Принята к публикации: 18.12.2025

ABOUT THE AUTHOR

Artem A. Koryakin –
Director, Federal Budgetary Institution "Territorial Fund of Geological Information for the Siberian Federal District",
Novosibirsk, Russian Federation; e-mail: rtn-kaa@mail.ru

Article info

Received: 22.08.2025
Revised: 10.12.2025
Accepted: 18.12.2025

Инфракрасная диагностика геомеханических процессов в горных выработках, обусловленных природными и техногенными факторами

Д. И. Блохин✉

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва,

Российская Федерация

✉ dblokhin@yandex.ru

Резюме. Излагаются методика и результаты экспериментальных исследований, выполняемых для обоснования эффективности использования терморadiационных (ИК-радиометрических) измерений для диагностики изменений напряженного состояния массивов во времени. Описаны испытания образцов геоматериалов при различных режимах нагружения в условиях одноосного сжатия, выполнявшиеся с синхронной регистрацией изменений параметров терморadiационных сигналов и данных тензометрии. Описана конструкция «крупномасштабного» стенда для знакопеременного нагружения относительно большого ($\approx 0,35 \text{ м}^3$) объема грунта. Изменения во времени напряженного состояния в призабойной зоне скважины, устроенной в модели грунтового массива, регистрируются с помощью синхронных записей сигналов ИК-радиометра и установленных внутри нагружаемого объема тензометрических элементов (мессдоз). Продемонстрирована достоверность оценки изменений напряжений в массиве грунта во времени по данным ИК-радиометрии. С физической точки зрения полученные результаты показывают, что фиксируемые термодинамические процессы, сопутствующие деформированию грунтового массива, с достаточной точностью можно считать адиабатическими, то есть в условиях, моделирующих реальные натурные измерения, выполняется основная физическая предпосылка эффективности терморadiационной диагностики. Результаты экспериментов указывают на возможность использования комплексных геофизических измерений в системах мониторинга реальных геомеханических событий.

Ключевые слова: горные породы, напряжения, деформации, диагностика, тепловое излучение, тензометрия

Для цитирования: Блохин Д. И. Инфракрасная диагностика геомеханических процессов в горных выработках, обусловленных природными и техногенными факторами. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):26-31. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-26-31>.

Infrared diagnostics of geomechanical processes in mining workings caused by natural and man-made factors

D. I. Blokhin✉

National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

✉ dblokhin@yandex.ru

Abstract. The methodology and results of experimental studies performed to substantiate the effectiveness of using thermoradiological (IR-radiometric) measurements to diagnose changes in the stress state of arrays over time are described. The tests of geomaterial samples under various loading conditions under uniaxial compression conditions are described, which were performed with synchronous registration of changes in the parameters of thermal radiation signals and strain gauge data. The design of a “large-scale” stand for alternating loading of a relatively large ($\approx 0.35 \text{ m}^3$) volume of soil is described. Changes in the stress state over time in the bottomhole zone of the “well”, arranged in a model of a soil massif, are recorded using synchronous recordings of IR radiometer signals and strain gauge elements installed inside the loaded volume. The reliability of estimating stress changes in the “array” of soil over time according to IR radiometry data is demonstrated. From a physical point of view, the obtained results show that the recorded thermodynamic processes accompanying the deformation of the soil “massif” can be considered adiabatic with sufficient accuracy, i.e. in conditions simulating real field measurements, the basic physical prerequisite for the effectiveness of thermoradiological diagnostics is fulfilled. The experimental results indicate the possibility of using complex geophysical measurements in monitoring systems for real geomechanical events.

Keywords: rocks, stresses, deformations, diagnostics, thermal radiation, strain gauge

For citation: Blokhin D. I. Infrared diagnostics of geomechanical processes in mining workings caused by natural and man-made factors. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):26-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-26-31>.

Введение

Современное горное производство характеризуется увеличением глубины разработки месторождений полезных ископаемых, вовлечением в эксплуатацию запасов, находящихся в сложных горногеологических условиях, что обуславливает проявления геомеханических процессов в разнообразных катастрофических формах (горные удары, техногенные землетрясения, массовые обрушения, выбросы пород и газа и т. п.), приводящих к большому экономическому и социальному ущербу. Для достоверной оценки и прогноза характера протекания таких процессов наиболее эффективно использование методов геоконтроля, в основу которых положены физические модели, однозначно связывающие регистрируемые физические параметры с определяемыми вариациями механических величин [1–4].

Одним из таких активно развиваемых методов является терморadiационная бесконтактная диагностика (инфракрасная (ИК) радиометрия) [5–9], интерпретация результатов которой основана на использовании известных термомеханических эффектов: изменения температуры твердого тела при ее адиабатическом деформировании (термоупругий и термопластический эффекты) [10], а также зависимости интенсивности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры [11]. Преимущество ИК-измерений перед другими экспериментальными способами исследования изменений напряженного состояния – бесконтактность, что делает их применимыми в условиях, когда измерить изменения напряжений с помощью других способов трудно или практически невозможно, например в призабойных зонах глубоких скважин.

Цель исследований: разработка методических подходов и измерительных средств диагностики геомеханического состояния породных массивов по записям сигналов инфракрасного излучения, сопутствующего процессам деформирования и разрушения геоматериалов.

Материал и методы исследования

В классических опытах Джоуля, Вебера и других, выполненных в середине XIX века, было показано, что при адиабатическом растяжении твердого тела с положительным коэффициентом термического расширения температура понижается, а при сжатии – возрастает [10]. В литературе указанное явление на стадии линейного деформирования носит название термоупругого эффекта, а при уровне напряжений, превышающем предел упругости, – термопластического эффекта [10].

Хорошим приближением в описании термоупругого эффекта является формула Кельвина [10]

$$\Delta T = \frac{\alpha}{\rho C_p} \cdot T_0 \cdot \Delta P, \quad (1)$$

где T_0 и ΔT – начальная температура тела и ее изменение при нагружении;

ΔP – изменение первого инварианта тензора напряжений;
 α – линейный коэффициент термического расширения;
 C_p – удельная (на единицу объема) теплоемкость.

Возможность получения информации о $d\Pi(t)$ по измерениям $dT(t)$ представляется очевидной, однако ее реализация для геоматериалов затруднена тем, что значения $dT(t)$ имеют порядок 0,001 К. Кроме того, условия реальных геомеханических и геофизических экспериментов не позволяют использовать стандартные методы температурных измерений, особенно при измерениях в грунтах.

В описываемой методике применяется принцип бесконтактного измерения малых вариаций температуры, основанный на известной зависимости мощности ИК-излучения с поверхности тела от ее температуры $W(T) = \epsilon_r \sigma T^4$ ($\epsilon_r < 1$ – коэффициент излучательной способности, σ – постоянная Стефана – Больцмана) [6]. Малость $dT(t) / T_0$ позволяет линеаризовать последнее соотношение и связать вариации мощности потока $dW(T)$ со значениями $dT(t)$ пропорциональной зависимостью с коэффициентом $A_c = \epsilon_r \sigma T_0^3$.

Предполагая далее пропорциональность вариаций результатов ИК-измерений $dU(T)$ вариациям $dW(T)$ с коэффициентом A_r , зависящим от параметров аппаратуры, и используя (1), получаем

$$d\Pi(t) = A^{-1} dU(t), \quad (2)$$

где $A = A_m A_c A_r$, В/Па.

Для обоснования данного предположения и выявления границ его применимости при различных режимах изменения нагрузки во времени проводились серии экспериментов с мелко- и крупномасштабными образцами геоматериалов на лабораторных стендах, включающих в себя как устройство нагружения, так и многоканальную систему измерения, преобразования и автоматической передачи регистрируемых данных в компьютер.

Специально разработанное программное обеспечение позволяет наблюдать эволюцию регистрируемых сигналов в режиме реального времени, а также сохранять полученный массив данных в виде текстового файла. Описываемая экспериментальная установка позволяет осуществлять различные воздействия (схемы нагружений) и синхронно регистрировать отклики геоматериалов на эти воздействия как на основе ИК-измерений, так и с помощью стандартных тензометрических измерений. В качестве первичного приемника потока инфракрасного излучения в описываемых измерениях использовался промышленно выпускаемый детектор РТН-31 [12], который представляет собой термобатарею, составленную из последовательно соединенных высокочувствительных термопар, нанесенных на плату методом вакуумного напыления. Детектор работает на основе преобразования энергии потока теплового излучения, падающего на приемную площадку термоэлемента в термо-ЭДС, пропорциональную величине потока излучения.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

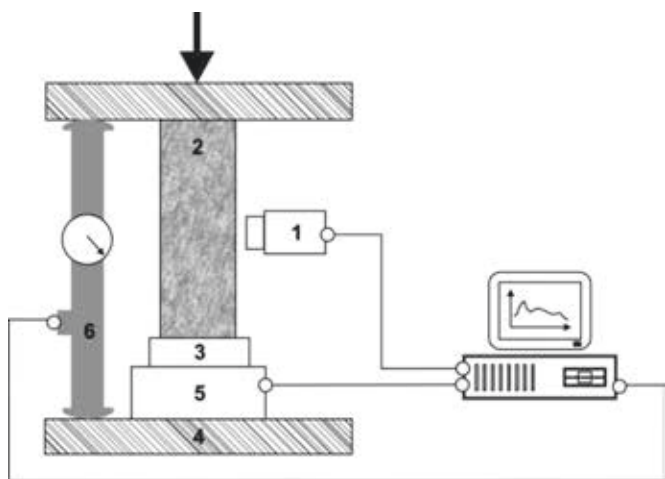


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда /
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand

Датчик ИК-излучения (1) устанавливается примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0,5–1 см от его поверхности. Между пластинкой (3), на которую опирается образец, и плитой (4) устанавливается тензометрический элемент (5) для измерения изменений приложенного к образцу усилия. В состав измерительной установки также включен индикатор продольной деформации (6), находящийся между плитой (4) и подвижной траверсой пресса.

Ниже описываются экспериментальные исследования проявлений термомеханических эффектов в геоматериалах, подвергаемых различным режимам механического нагружения.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты экспериментов, в которых образец мрамора подвергался квазипериодическим воздействиям с характерными частотами в диапазоне 0,5–5 Гц. Записи значений выходных сигналов, получаемых с ИК-радиометра $V_w(t)$ и от тензометра $V_m(t)$, соответствующие одному из проведенных испытаний, показаны на рисунке 2.

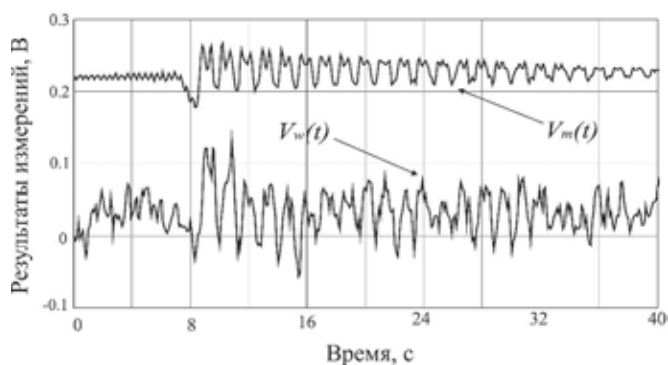


Рис. 2. Исходные записи результатов измерений (в вольтах) при исследованиях на малом образце горной породы (мрамора), подвергаемом квазипериодическому нестационарному одноосному нагружению /
Fig. 2. Initial records of measurement results (in volts) during studies on a "small" rock sample (marble) subjected to quasi-periodic nonstationary uniaxial loading

Для вычисления оценок изменений во времени первого инварианта тензора напряжений $d\Pi_w(t)$ и $d\Pi_m(t)$ (МПа) соответственно по зависимостям $V_w(t)$ и $V_m(t)$ использовались переходные коэффициенты, величины которых определялись по данным тарировки, проводившейся перед каждой серией экспериментов.

Для количественного описания экспериментальных данных, выделения из них полезной составляющей и ее обработки привлекались методы спектрального анализа (Фурье и вейвлет-представления) [13]. При этом выполнялась коррекция обрабатываемых временных последовательностей с учетом их существенной нестационарности. Сравнение зависимостей напряжений от времени, определенных на основе сигнала ИК-радиометра, с зависимостями, полученными на основе данных тензометрических измерений, производилось с учетом результатов вычисления оценок их вероятностных характеристик.

На рисунке 3 показаны графики определенных после упомянутой корректировки исходных записей оценок, зависящих от частоты ν спектральных плотностей $H_{\Pi_w}(\nu)$ и $H_{\Pi_m}(\nu)$ соответствующих зависимостей $d\Pi_w(t)$ и $d\Pi_m(t)$.

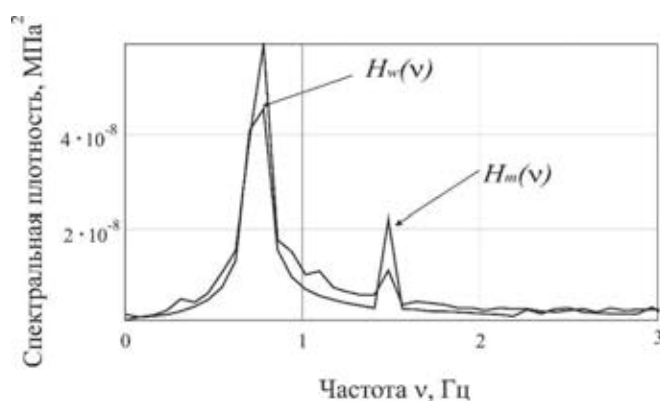


Рис. 3. Спектральные плотности вариаций напряжений $d\Pi_w(t)$ и $d\Pi_m(t)$, по данным с тензодатчика $H_m(\nu)$ и с ИК-радиометра $H_w(\nu)$, МПа² × с /
Fig. 3. Spectral densities of voltage variations $d\Pi_w(t)$ and $d\Pi_m(t)$, according to data from the strain gauge $H_m(\nu)$ and from the IR radiometer $H_w(\nu)$

Видно, что спектральные плотности $H_{\Pi_w}(\nu)$ и $H_{\Pi_m}(\nu)$ весьма похожи. Так, спектральный состав ИК-сигнала соответствует с учетом наличия в нем шумовых компонентов спектральному составу эталонного тензометрического сигнала, а для достаточно больших уровней вариаций напряжений амплитуды колебаний этих двух сигналов оказываются пропорциональными. Примерно такая же похожесть вероятностных характеристик обнаруживается и в других проведенных опытах.

В ходе инициированных этими работами исследований были поставлены более общие методические задачи. В частности, рассматривалась возможность расширения диапазона использования ИК-диагностики при неадиабатических условиях деформирования и значениях нагрузок, приближающихся к предразрушающим и разрушающим величинам. Для обоснования возможности использования терморadiационных измерений для диагностики процессов деформирования горных пород при значениях нагрузок, приближающихся к предразрушающим и разрушающим величинам, проводились эксперименты на образцах геоматериалов различных типов.

На рисунке 4 для одного из испытуемых образцов (бетон с крупным заполнителем из гранитного щебня) представлены зависимости от времени сигналов тензоэлемента и датчика ИК-излучения. Сжатие образца осуществлялось с заданным шагом возрастания нагрузки. Анализ полученных записей сигналов позволяет выявить некоторые особенности деформирования исследуемого образца.

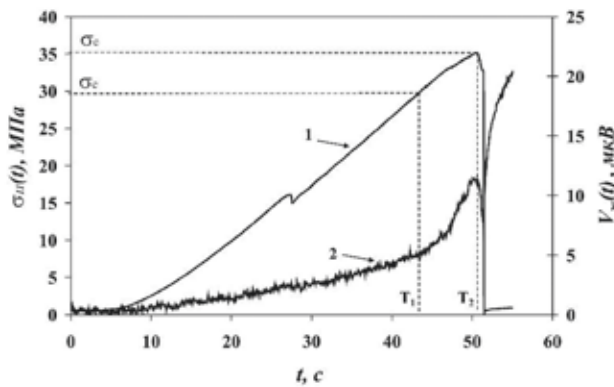


Рис. 4. Зависимости от времени осевого напряжения $\sigma_{11}(t)$ (1) и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (2) при испытаниях образца бетона при $d\sigma_{11}/dt = \text{const} = 0,7 \text{ МПа/с}$

Fig. 4. Dependences on the axial stress time $\sigma_{11}(t)$ (1) and the intensity of the IR radiation $V_w(t)$ (2) when testing a concrete sample at $d\sigma_{11}/dt = \text{const} = 0,7 \text{ MPa/s}$

Так, при монотонном возрастании нагрузки в четко фиксируемой по виду графика ИК-сигнала точке $T_1 \approx 44 \text{ с}$ (рис. 4, кривая 2) происходит резкое возрастание значений интенсивности ИК-излучения по сравнению с областью линейной термоупругости.

При возрастании уровня нагрузки, когда деформации материала образца выходят за пределы упругости, внутри него начинают развиваться нелинейные диссипативные процессы, в условиях которых возрастание температуры и, соответственно, приращения интенсивности ИК-излучения оказываются более значимыми, чем при упругом режиме.

Понятно, что момент времени T_2 , соответствующий изменению наклона этого графика, соответствует пределу упругости образца σ_e . Указанный нелинейный участок, соответствующий деформациям образца за пределом упругости, заканчивается в момент $T_2 \approx 51 \text{ с}$ с резким падением значений интенсивности теплового излучения, которое соответствует разуплотнению образца при его дезинтеграции. Сопоставляя графики изменений нагрузки и интенсивности ИК-излучения, можно сделать вывод, что момент, в который наступает указанный выше обрыв графика ИК-сигнала, соответствует пределу прочности образца σ_c .

Полученные на малых лабораторных образцах результаты позволили сделать вывод, что ИК-радиометрия может быть эффективно применена в системах обнаружения происходящих в породных массивах природных и техногенных механических процессов, при этом на ранних, допредельных, стадиях их развития.

Другой результат, открывающий уникальные возможности геомониторинга механических процессов в массивах слабых несвязных грунтов, – показанная на достаточно крупномасштабной модели возможность бесконтактного контроля изменений напряжений на забое скважины, устроенной в массиве такого грунта.

Для знакопеременного нагружения объемов грунта был сконструирован лабораторный стенд (рис. 5), на котором благодаря увеличению размеров области испытаний можно устраивать в обследуемом объеме модельную скважину и выполнять измерения, дающие информацию о вариациях напряжений у ее забоя и внутри массива. При изменениях вертикальной нагрузки на установленный на поверхности объема штамп происходят изменения напряженного состоя-

ния грунта как во всем объеме, так и в окрестности скважины и на поверхности ее забоя.

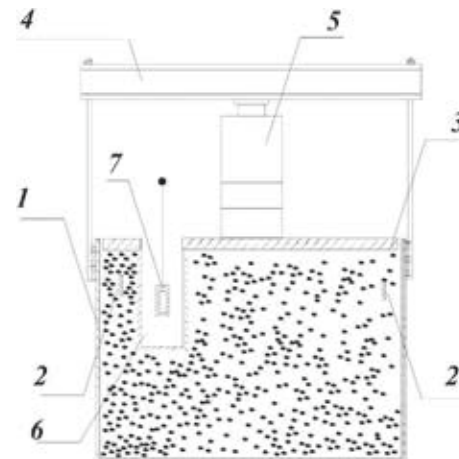


Рис. 5. Схема испытательного стенда и расположения датчиков:

- 1 – цилиндрический лоток;
 - 2 – мессдозы; 3 – распределительный штамп; 4 – упорная рама;
 - 5 – гидравлический домкрат;
 - 6 – скважина; 7 – забой; 8 – ИК-радиометр /
- Fig. 5. Diagram of the test bench and the location of the sensors:
- 1 – cylindrical tray; 2 – messdoses;
 - 3 – distribution stamp; 4 – thrust frame; 5 – hydraulic jack; 6 – well;
 - 7 – bottom hole; 8 – IR radiometer

В экспериментах контрольные измерения вариаций горизонтальных напряжений в массиве вне зоны влияния скважины выполнялись с использованием мессдоз. Соответствующие им изменения напряженного состояния грунта на забое скважины регистрировались с помощью ИК-радиометра, который свободно подвешивается по оси скважины так, что его первичный преобразователь располагается на высоте 1...6 см от забоя. Чередующиеся циклы нагружения и разгрузки, инициируемые соответствующими изменениями давления в гидравлическом домкрате, начинаются через 8...10 с после начала регистрации сигналов и повторяются 1–5 раз в течение $T \approx 100 \text{ с}$. Характерные примеры записей значений выходных сигналов, получаемых в результате прохождения первичных сигналов ИК-радиометра ($V_w(t)$) и тензометров ($V_{m1}(t)$ и $V_{m2}(t)$) через измерительно-вычислительный тракт, показаны на рисунке 6.

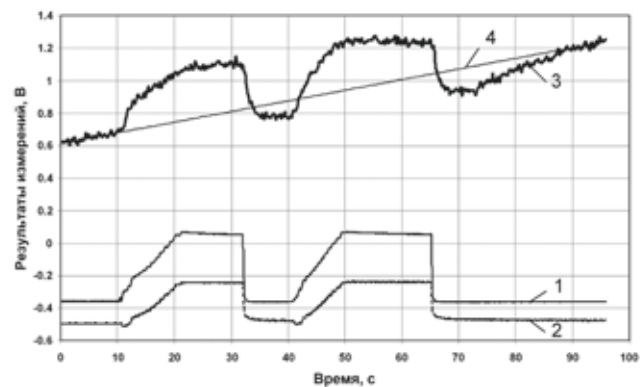


Рис. 6. Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов тензометрии (мессдозы) $V_{m1}(t)$ и $V_{m2}(t)$ (1, 2) и ИК-радиометрии $V_w(t)$ (3), а также трендовая составляющая $F_t(t)$ (4) функции $V_w(t)$

Fig. 6. Experimental results of measurements of the output signals of strain gauge (massdose) $V_{m1}(t)$ and $V_{m2}(t)$ (1, 2) and IR radiometry $V_w(t)$ (3), as well as the trend component $F_t(t)$ (4) of the function $V_w(t)$

При обработке результатов ИК-измерений и нахождения по ним количественной оценки вариаций напряжений, действующих на забое скважины, учитывается наличие в полученных временных зависимостях низкочастотной трендовой составляющей, появление которой обусловлено изменениями внешних условий. Трендовая составляющая $F_r(t)$ функции $V_w(t)$ оценивается ее прямолинейной аппроксимацией через начальный (до первого нагружения) и конечный (через 10–20 с после снятия нагрузки) участки (см. рис. 5). При дальнейшем анализе данных измерений вместо $V_w(t)$ рассматривалась функция $U_w(t) = V_w(t) - F_r(t)$, практически не зависящая от тренда.

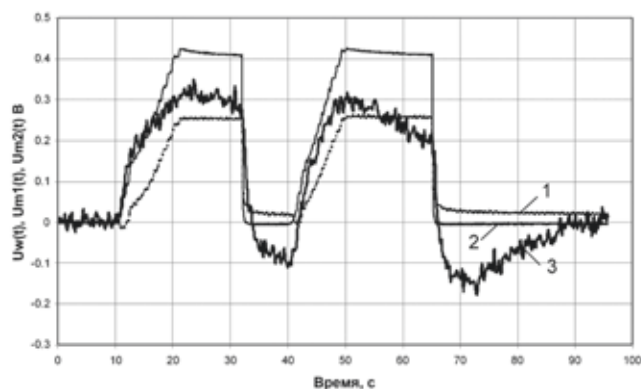


Рис. 7. Модифицированные временные зависимости выходных сигналов тензометрии

$U_{m1}(t)$ и $U_{m2}(t)$ (1, 2) и ИК-радиометрии $U_w(t)$ (3) /
Fig. 7. Modified time dependences of the output signals of strain gauge
 $U_{m1}(t)$ and $U_{m2}(t)$ (1, 2) and IR radiometry $U_w(t)$ (3)

Графики, представленные на рисунке 7, иллюстрируют качественную идентичность результатов измерений вариаций мощности ИК-излучения вариациям параметров напряженного состояния в грунте, однозначно определяющих соответствующие вариации напряжений в той зоне (забой скважины), где выполняются ИК-измерения. Таким

образом, на большом объеме грунта показана возможность достоверного определения качественных (моменты изменений напряженного состояния массива) и количественных (знаки и величины скачков) параметров процесса изменений напряжений во времени на основе бесконтактных ИК-измерений.

Выводы

Проведенные исследования показывают применимость данной методики для идентификации механических процессов в массивах горных пород.

К числу основных практических задач, для решения которых с успехом могут быть использованы результаты ИК-радиометрических измерений, относятся:

1) оперативный контроль за динамикой зон разгрузки в массиве при экспериментальных исследованиях напряженного состояния массива и выполнении горнопроходческих и очистных работ.

2) оперативный контроль за динамикой деформационных процессов в эксплуатируемых подземных выработках, обеспечивающий своевременное выполнение мероприятий по стабилизации работы сооружения и позволяющий избежать возможные аварии.

Так, например, использование ИК-радиометрических измерений в составе автоматизированной системы поддержки технологических решений и комплексного синтезирующего мониторинга (АС ППТР и КСМ) позволило оценить реальные диапазоны изменения напряжений в угольном пласте (шахта им. С. М. Кирова ОАО «СУЭК Кузбасс») при выемочных работах и выявить характер изменений нагрузок во времени [14, 15].

Практическое применение ИК-радиометрии для полевых измерений вариаций напряженного состояния массивов грунтов может расширить возможности экспериментальных наблюдений за происходящими в них динамическими и сейсмическими процессами, стать существенно-информативным дополнением к традиционно используемым геофизическим методам оценки изменений их напряженного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. Новосибирск, 1999: 328.
Kurlenya M.V., Oparin V.N. Borehole geophysical methods for diagnostics and control of the stress-strain state of rock formations. Novosibirsk, 1999: 328. (In Russ.).
2. Bepal'ko A.A., Dann D.D., Petrov M.V., et al. Electromagnetic methods for testing changes in stress-strain state of dielectric materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*; 2021; 57 (10): 865-876. <https://doi.org/10.1134/S1061830921100028>.
3. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н. и др. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022; 333 (12): 99-110. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., et al. justification of criteria for local prediction of impact safety by registering natural electromagnetic radiation at the mines of AO "SUEK-Kuzbass". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022; 333 (12): 99-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
4. Баженова Е.А. Применение геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований для выявления зон геодинамической активности в рудных скважинах. *Литосфера*. 2025; 25 (3): 644-655. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>.
Bazhenova E.A. Application of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in combination with standard geophysical research methods to identify geodynamic activity areas in ore boreholes. *Lithosphere*. 2025; 25 (3): 644-655. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>.
5. Блохин Д.И., Иванов П.Н., Дудченко О.Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании. *Записки Горного института*. 2021; 247: 3-11. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1>.
Blokhin D.I., Ivanov P.N., Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247: 3-11. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1>.

6. Huang J., Yu M., Zhang C., et al. Quantitative spatial analysis of thermal infrared radiation temperature fields by the standard deviational ellipse method for the uniaxial loading of sandstone. *Infrared Physics & Technology*. 2022; 123: 104150. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104150>.
7. Jaiswal M., Sebastian R., Mulaveesala R. Thermal monitoring and deep learning approach for early warning prediction of rock burst in underground structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2024; 57 (10): 105502. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad11bb>.
8. Cao K., Yuan Q., Xie G., et al. Infrared Radiation Characteristics During Crack Development in Water-Bearing Sandstone. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 58 (3): 209-214. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09730-2>.
9. Cao G., Ma L., Guo Z., et al. Exploring the evolution of infrared radiation characteristics in coal bodies under water pressure during tunnel excavation. *Infrared Physics & Technology*. 2025. 145: 105665. DOI 10.1016/j.infrared.2024.105665.
10. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел: Т. 2. Москва, 1969: 863.
Nadai A. Plasticity and destruction of solids, Vol. 2. Moscow, 1969:863. (In Russ.).
11. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. Москва, 1978: 400.
Kriksunov L.Z. Handbook on the Basics of Infrared Technology. Moscow, 1978: 400. (In Russ.).
12. Ильин А.С. Термоэлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений. *Метрология*. 2005; (11): 19-30. Ilyin A.S. Thermoelectric Receivers of Optical Radiation with Film and Wire Thermocouples for Precision Measurements. *Metrology*. 2005; (11): 19-30. (In Russ.).
13. Бахтина А.С., Блохин Д.И., Шейнин В.И. Непрерывное вейвлет-разложение как средство повышения информативности спектрального анализа данных физических измерений в системах геоконтроля. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009; (3): 124-130
Bakhtina A.S., Blokhin D.I., Sheinin V.I. Continuous wavelet-decomposing as means of increasing the informativeness of spectral analysis made on the physic measurement data in the geological control systems. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; (3): 124-130. (In Russ.).
14. Кубрин С.С. Разработка геотехнологического кластера безопасного освоения опасных по гео- и газодинамическим явлениям угольных пластов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013; (S5): 68-84.
Kubrin S.S. cluster development geotechnological safe development of dangerous on geo- and coal seam gas-dynamic. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; (S5): 68-84. (In Russ.).
15. Кубрин С.С., Журавлев Е.И. Использование системы мониторинга и прогноза динамических явлений для обеспечения промышленной безопасности горных работ. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. *Материалы XXVII Международной научной школы им. академика С. А. Христиановича*. Симферополь, 2017; 41-49.
Kubrin S.S., Zhuravlev E.I. The use of a system for monitoring and forecasting dynamic phenomena to ensure the industrial safety of mining operations. Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings. *Materials of the XXVII International Scientific School named after academician S. A. Khristianovich*. Simferopol, 2017; 41-49. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Блохин Дмитрий Иванович –

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики,
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», 119049, Москва, Российская
Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4652-661X>; e-mail:
dblokhin@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.11.2025
Поступила после рецензирования: 02.12.2025
Принята к публикации: 08.12.2025

ABOUT THE AUTHOR

Dmitry I. Blokhin –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of
the Department of Physics, National University of Science and
Technology “MISIS”, 119049, Moscow, Russian Federation;
<https://orcid.org/0000-0002-4652-661X>; e-mail: dblokhin@yandex.ru

Article info

Received: 12.11.2025
Revised: 02.12.2025
Accepted: 08.12.2025

Failure mechanism and stability control of roadways under challenging geological conditions

L. Lu^{1,2}✉

¹ China University of Mining and Technology-Beijing, China

² China-Russia Dynamics Research Center, China University of Mining and Technology-Beijing, China

✉ linlu_cumtb@163.com

Abstract. In special geological zones formed by coal seam spontaneous combustion, burnt rock exhibits a loose structure, well-developed joints and fissures, and significantly reduced strength, resulting in considerable challenges for roadway stability control. This paper investigates the deformation and failure characteristics and stability control mechanisms of roadway surrounding rock affected by thermal alteration, using the 3202 return airway of Dawan Coal Mine as a case study. Based on the Hoek-Brown strength criterion and elastic-plastic mechanics theory, a stability analysis model for burnt rock roadway surrounding rock was established. The extent of the loosening zone was verified through UDEC numerical simulation and borehole observations, revealing a loosening zone depth ranging from approximately 3.1 m to 4.2 m. To address these challenges, this paper proposes a comprehensive control technology based on multi-stage coordinated support, termed the Reinforcement-Anchorage-Constraint (RAC) system. This system integrates grouting reinforcement (Reinforcement), bolt and cable support (Anchorage), and metal shed support (Constraint) to ensure roadway stability. Field monitoring results demonstrate that the roof-to-floor convergence is 71 mm and the ribs convergence is 27 mm, indicating overall roadway stability. The research findings provide both theoretical foundation and practical engineering guidance for stability control of roadways in burnt rock zones.

Keywords: Burnt rock, Roadway stability, Hoek-Brown criterion, Combined support system, Field test

For citation: Lu L. Failure mechanism and stability control of roadways under challenging geological conditions. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):32-39. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-32-39>.

Механизм разрушения и контроль устойчивости автомобильных дорог в сложных геологических условиях

Л. Лу^{1,2}✉

¹ Китайский университет горного дела и технологий – Пекин, Китай

² Центр исследований динамики взаимоотношений между Китаем и Россией,

Китайский университет горного дела и технологий – Пекин, Китай

✉ linlu_cumtb@163.com

Резюме. В особых геологических зонах, образованных самовозгоранием угольных пластов, горелая порода имеет рыхлую структуру, хорошо развитые соединения и трещины, а также значительно сниженную прочность, что приводит к значительным проблемам контроля устойчивости выработки. В данной статье исследуются характеристики деформации и разрушения, а также механизмы контроля устойчивости породы вокруг выработки, пострадавшей от термических изменений, на примере вытяжного воздуховода 3202 угольной шахты Давань. На основе критерия прочности Хука-Брауна и теории упругопластической механики была создана модель анализа устойчивости окружающей выработки из горелой породы. Протяженность зоны разрыхления была проверена с помощью численного моделирования UDEC и наблюдений за скважинами, выявивших глубину зоны разрыхления приблизительно от 3,1 м до 4,2 м. Для решения этих проблем в данной статье предлагается комплексная технология контроля, основанная на многоступенчатой скоординированной поддержке, называемая системой армирования-анкерования-ограничения (RAC). Эта система объединяет в себе армирование бетонной смесью (армирование), анкерное крепление болтами и тросами (анкерное крепление) и металлическую опору навеса (ограничение) для обеспечения устойчивости дорожного полотна. Результаты натурных наблюдений показывают, что схождение кровли и пола составляет 71 мм, а схождение ребер – 27 мм, что свидетельствует об общей устойчивости дорожного полотна. Результаты исследования предоставляют как

теоретическую основу, так и практические инженерные рекомендации по контролю устойчивости дорожного полотна в зонах горелых пород.

Ключевые слова: горелая порода, устойчивость дорожного полотна, критерий Хука-Брауна, комбинированная система поддержки, полевые испытания

Для цитирования: Лу Л. Механизм разрушения и контроль устойчивости автомобильных дорог в сложных геологических условиях. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):32-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-32-39>.

Introduction

Shallow coal seams are highly susceptible to spontaneous combustion due to surface weathering and oxidation conditions. Under high temperature heating and thermal effects, the surrounding rock structure and composition in coal seam spontaneous combustion zones undergo alterations and transform into burnt rock [1–3]. As a special rock type, burnt rock commonly exhibits characteristics such as loose structure, well-developed joints and fissures, and high porosity. Its overall mechanical properties are significantly deteriorated, leading to reduced bearing capacity of the surrounding rock and thereby posing severe challenges to the stability control of underground roadways.

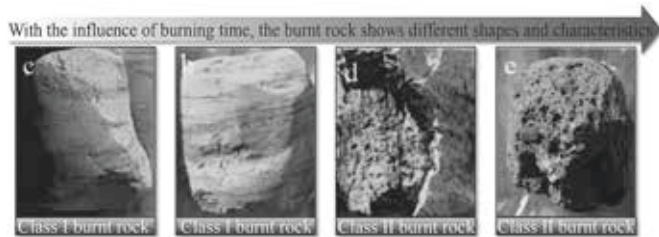


Fig. 1. Characteristics of burnt rock [1]

Currently, China's coal resource mining intensity continues to increase, with massive underground roadway engineering scale, and the length of newly excavated roadways exceeds 12,000 km annually [4–7]. Conventional support designs frequently fail in burnt rock areas, easily triggering safety hazards such as surrounding rock instability, collapse, and excessive deformation, causing serious safety risks and economic losses.

Existing research has achieved significant progress in disaster prevention and safe mining in burnt coal seam areas, primarily focusing on hydraulic connectivity, structural characteristics, and boundary identification of burnt zones [8–11]. However, research on the stability mechanisms of surrounding rock during roadway excavation in burnt rock and corresponding control technologies remains relatively limited.

This study takes the 3202 return airway of Dawan Coal Mine as a case study to analyze the factors influencing roadway stability in burnt rock zones and the failure mechanisms of surrounding rock, determine the extent of the loosening zone, and propose a comprehensive control technology termed the Reinforcement-Anchorage-Constraint (RAC) system. The effectiveness of this approach has been validated through field application.

Engineering background and failure observations

This study focuses on the 3202 working face roadway of Dawan Coal Mine in the Shenfu mining area, Yulin City, Shaanxi Province. The mine currently extracts the 3-1 coal seam at a depth of approximately 150 m, with an average thickness of 3.1 m and a simple seam structure. The strata attitude trends high in the

northeast and low in the southwest, with an average dip angle of 0.5°.

The coal seam overlying the 3202 return airway has been completely oxidized and eroded. The eastern and northern portions of the 3-1 coal seam are located within the burnt zone, causing localized areas of the 3202 working face to be affected by thermal effects from the burnt region, as shown in Fig. 2(a). The lithology of the working face roof and floor is presented in Fig. 2(b). Due to the influence of the burnt zone, substantial smoke emissions and surface cracks are observed at the mine surface, as shown in Fig. 2(c).

The 3202 return airway has a rectangular cross-section with dimensions of 5500 mm (width) × 3000 mm (height). The initial support scheme employed bolt-mesh-cable support. The roadway roof and non-mining rib utilize Φ20 mm × 2000 mm left-handed thread steel bolts, while the mining rib employs Φ18 mm × 1800 mm fully-threaded resin bolts, both with a spacing of 1000 mm × 1000 mm. The bolts are end-anchored using CK2360 resin cartridges. One Φ15.24 mm × 6300 mm steel strand cable is installed at the roof center with a row spacing of 3000 mm, as illustrated in Fig. 2(d).

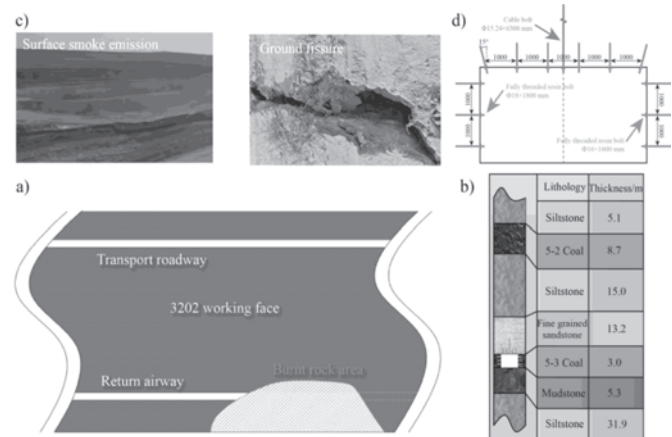


Fig. 2. Comprehensive geological column and working face layout

During roadway excavation, the surrounding rock experiences degradation of its structure and mechanical properties due to prolonged exposure to high temperatures from the adjacent burnt rock, resulting in significantly reduced overall integrity and stability.

At the excavation face, it can be observed that the roof is affected by the burnt zone, with color changes appearing yellow and brown, and a large number of cracks and separations appearing. Field investigations (Fig. 3) reveal the following main problems: (1) The roof structure is loose with poor integrity; (2) The surrounding rock strength is reduced with insufficient bearing capacity; (3) The existing support system is difficult to adapt to the deformation characteristics of burnt rock surrounding rock.

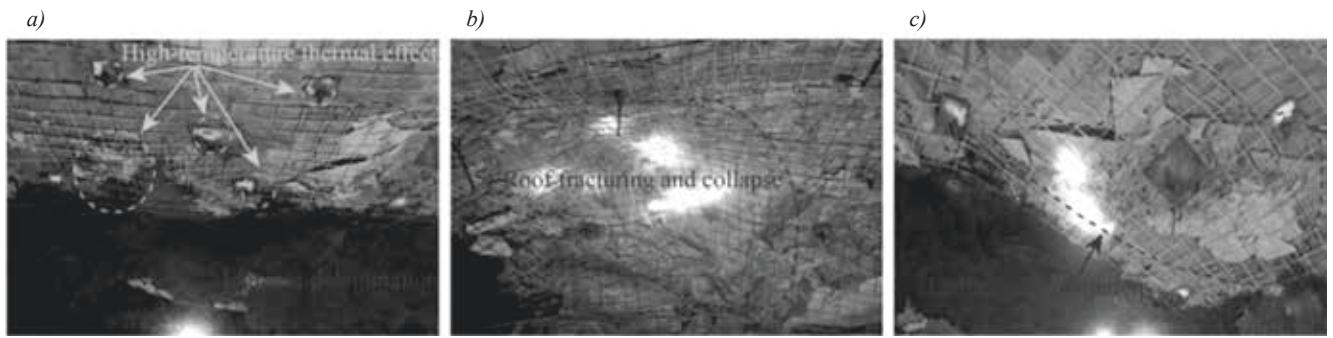


Fig. 3. Deformation and failure of roadway surrounding rock

Roadway Stability Analysis in Burnt Rock Zones

To deeply analyze the stability of roadway surrounding rock in burnt rock zones, this paper adopts the Hoek-Brown strength criterion to theoretically calculate the range of the plastic zone of surrounding rock. By introducing the Hoek-Brown constant m_i , disturbance factor α , rock mass fragmentation degree index s , and geological strength index GSI into the Hoek-Brown criterion, an accurate evaluation of roadway stability in areas affected by burning alteration is conducted.

The mechanical model of roadway surrounding rock zoning in burnt rock areas is shown in **Fig. 4**. The roadway surrounding rock is divided into three zones: the elastic zone, plastic softening zone, and fractured zone.

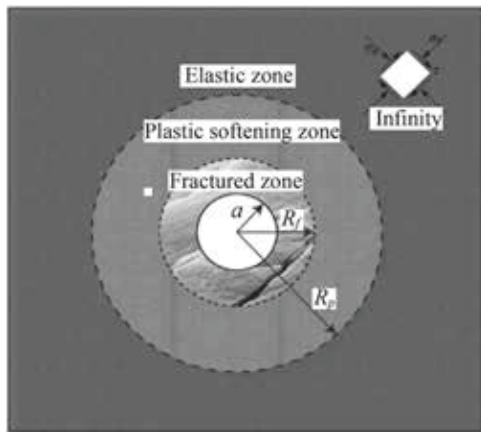


Fig. 4. Roadway mechanical model

Based on the above assumptions, the problem can be simplified to an axisymmetric plane strain problem. The equilibrium differential equation in polar coordinates can be expressed as:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

When plastic yielding and fracturing occur in the roadway surrounding rock, the stress conditions satisfy the modified Hoek-Brown failure criterion, which can be expressed as:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_c \cdot \left(m \cdot \frac{\sigma_r}{\sigma_c} \cdot e^{\frac{GSI-100}{28}} + s \right)^\alpha \quad (2)$$

$$m = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}}$$

where: σ_θ is the tangential stress at any point; σ_r is the radial stress at any point; σ_c is the uniaxial compressive strength of rock; m_i and α are dimensionless empirical parameters for different rock

masses; s is the rock mass fragmentation degree index, with a value range of 0.0~1.0; GSI is the geological strength index of rock mass.

According to elastoplastic mechanics, the stress distribution in the elastic zone is:

$$\begin{cases} \sigma_r^e = P_0 \left(1 - \frac{R_e^2}{r^2} \right) + \sigma_{r|_{r=R_e}} \frac{R_e^2}{r^2} \\ \sigma_\theta^e = P_0 \left(1 + \frac{R_e^2}{r^2} \right) - \sigma_{r|_{r=R_e}} \frac{R_e^2}{r^2} \end{cases} \quad (3)$$

By simultaneously solving the equilibrium equation and the modified H-B failure criterion subject to the stress and displacement boundary conditions of the plastic softening zone, the stress distribution is expressed as:

$$\begin{aligned} \sigma_r^p &= \frac{\sigma_c}{m_r^p} \left[m_r^p (1-\alpha) \ln \left(\frac{r}{R_p} \right) + \left(m_r^p \frac{\sigma_{r|_{r=R_p}}}{\sigma_c} + s_r^p \right)^{1-\alpha} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - \frac{\sigma_c}{m_r^p} s_r^p \\ \sigma_\theta^p &= \frac{\sigma_c}{m_r^p} \left[m_r^p (1-\alpha) \ln \left(\frac{r}{R_p} \right) + \left(m_r^p \frac{\sigma_{r|_{r=R_p}}}{\sigma_c} + s_r^p \right)^{1-\alpha} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - \frac{\sigma_c}{m_r^p} s_r^p \\ &\quad + \sigma_c \left[m_r^p (1-\alpha) \ln \left(\frac{r}{R_p} \right) + \left(m_r^p \frac{\sigma_{r|_{r=R_p}}}{\sigma_c} + s_r^p \right)^{1-\alpha} \right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \end{aligned} \quad (4)$$

where m_r^p , s_r^p , α are the Hoek-Brown parameters for the strain-softening rock mass; $\sigma_{r|_{r=R_p}}$ is radial stress at the boundary of the plastic softening zone.

According to the stress boundary conditions of the roadway fractured zone and the H-B yield criterion, the stress distribution can be obtained as:

$$\begin{cases} \sigma_r^f = \frac{\sigma_c}{m_r^f} \left[m_r^f (1-\alpha) \ln \left(\frac{r}{a} \right) + \left(m_r^f \frac{P_i}{\sigma_c} + s_r^f \right)^{1-\alpha} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - \frac{\sigma_c}{m_r^f} s_r^f \\ \sigma_\theta^f = \frac{\sigma_c}{m_r^f} \left[m_r^f (1-\alpha) \ln \left(\frac{r}{a} \right) + \left(m_r^f \frac{P_i}{\sigma_c} + s_r^f \right)^{1-\alpha} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - \frac{\sigma_c}{m_r^f} s_r^f \\ \quad + \sigma_c \left[m_r^f (1-\alpha) \ln \left(\frac{r}{a} \right) + \left(m_r^f \frac{P_i}{\sigma_c} + s_r^f \right)^{1-\alpha} \right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \end{cases} \quad (5)$$

where P_i is the support load.

$$\begin{cases} R_f = a \cdot \exp \left\{ \frac{1}{m_f \sigma_c} \left[(\alpha - 1) m_f \sigma_c + (1 - \alpha) \left(\left(m_f \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \sigma_c^{\frac{1}{1-\alpha}} + \frac{2 \sigma_c \left(s_f \sigma_c + \frac{2 P_0 m_f}{1 - \alpha} \right)}{1 - \alpha} \right)^{1-\alpha} \right] - \frac{(s_f)^{1-\alpha}}{(1 - \alpha) m_f} \right\} \\ R_p = R_f \cdot \exp \left\{ \frac{1}{m_p \sigma_c} \left[(\alpha - 1) m_p \sigma_c + (1 - \alpha) \left(\left(m_p \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} (\sigma_c)^{\frac{1}{1-\alpha}} + \frac{2 \sigma_c \left(s_p \sigma_c + \frac{2 P_0 m_p}{1 - \alpha} \right)}{1 - \alpha} \right)^{1-\alpha} \right] - \frac{(m_p \sigma_c \sigma_r^p + s_p \sigma_c^2)^{1-\alpha}}{(1 - \alpha) \sigma_c m_p} \right\} - a \end{cases} \quad (6)$$

where P_0 is the in-situ stress.

Based on stress continuity at the elastic-plastic interface, the analytical solution for the radius of the roadway loosening zone is derived as:

After the rock mass is burnt, the rock mass exhibits reduced GSI and uniaxial compressive strength, while the effects of the Hoek-Brown parameter m_i and rock mass integrity on stability become more pronounced. When exposed to groundwater, structural stability deteriorates significantly, with coal degrading to a mud-like state and GSI values predicted below 50[12]. Using parameters $m_i = 8$, $GSI = 45$, $\sigma_c = 20$ MPa, and $P_0 = 3$ MPa, the calculated extent of the loosening zone surrounding the 3202 return airway reaches approximately 3.8 m.

Validation of the Equivalent Radius Method

To validate the theoretical analysis presented above, UDEC numerical simulations were conducted to examine the extent of the plastic zone in the surrounding rock for both the equivalent circular and rectangular roadways. The plastic deformation characteristics are illustrated in Fig. 5.

The simulation results demonstrate that the plastic zone depth of the equivalent circular model closely matches that of the rectangular roadway. For the equivalent circular roadway, the plastic failure depth in the roof reaches approximately 3.5 m, with a maximum depth of 2.9 m in the ribs. For the rectangular roadway, the roof plastic failure depth is approximately 3.7 m, with a maximum rib depth of about 3.0 m.

Comparison between the calculated and simulated results indicates that the theoretical model based on the equivalent radius method accurately captures the plastic zone distribution characteristics of roadway surrounding rock in burnt rock zones, thereby demonstrating the applicability of this method and validating the theoretical analysis.

To further validate the theoretical calculations and numerical

simulation results, in-situ observations of the loosening zone extent in the 3202 return airway surrounding rock were conducted using a YTJ20 borehole observations system (Fig. 6). Boreholes were drilled at the left rib (1#), right rib (2#), and roof (3#), each with a depth of 8.0 m and diameter of 28 mm. The rib boreholes were oriented at 25° to the normal of the rib surface.

The observations reveal that the loosening zone in the roadway surrounding rock within the burnt rock area exhibits pronounced asymmetric distribution. The loosening zones in the left and right ribs extend approximately 3.1 m from the rib surface, while the roof loosening zone extends to 4.2 m. The extent of the loosening zone is in good agreement with both the theoretical calculations and UDEC numerical simulation results, confirming the reliability and applicability of the established theoretical model.

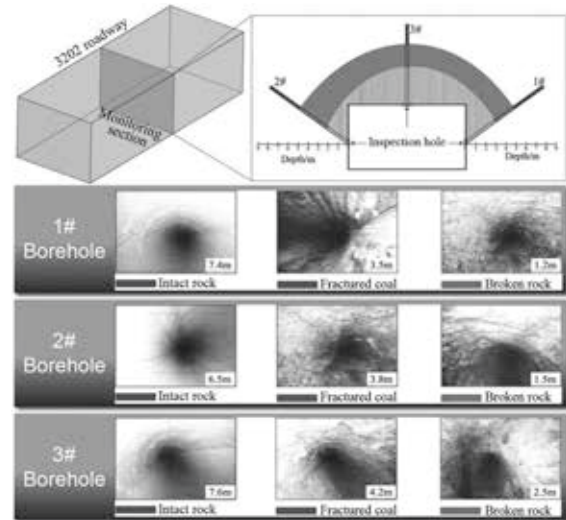


Fig. 6. Borehole observation layout and monitoring results

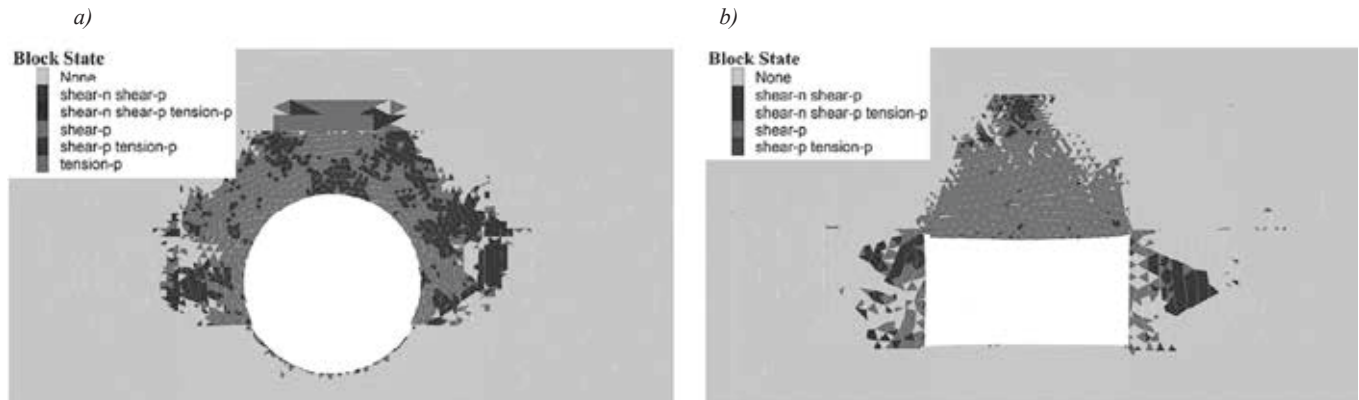


Fig. 5. Plastic failure zones in roadways: (a) Equivalent circular roadway; (b) Rectangular roadway

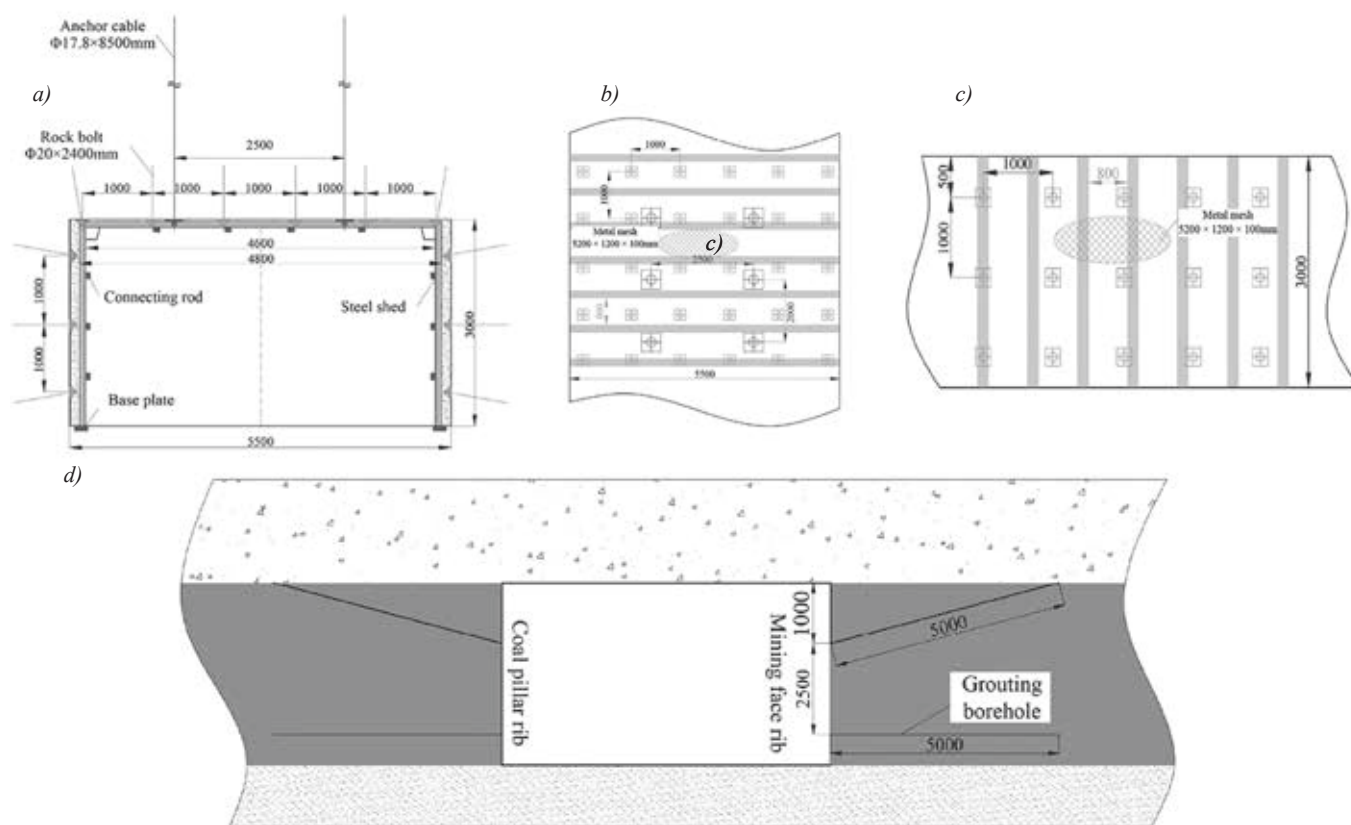


Fig. 7. Combined support of roadway: (a) Support section (b) Roof support (c) Rib support (d) Grouting borehole layout

Design of the RAC System

Based on the stability analysis of the roadway surrounding rock and the extent of the loosening zone in the burnt rock area, the RAC system was designed for the 3202 return airway at Dawan Coal Mine. The system integrates the three components of grouting reinforcement, bolt and cable support and metal shed support, as illustrated in Fig. 7.

(1) Grouting reinforcement

The burnt rock area adopts Marissan-type polymer material for grouting reinforcement, with a grouting final pressure of 1–2 MPa and an effective diffusion radius of 1.5–2.0 m. Two types of grouting boreholes, designated as L and LX, are installed in the coal pillar rib and mining rib of the 3202 return airway. Type L boreholes are positioned 1.0 m below the roof with an upward inclination of 15° and a depth of 5.0 m, while type LX boreholes are located 2.5 m below the roof with a horizontal orientation and a depth of 5.0 m. Both borehole types are arranged in a single row with 5.0 m spacing.

(2) Rock bolt and cable support

The roof and solid coal rib are supported using $\Phi 20 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$ fully threaded steel bolts, while the mining rib employs $\Phi 22 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$ threaded steel resin bolts. All bolts are installed at a spacing of $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ and anchored with CK2360 resin cartridges. Additionally, two $\Phi 17.8 \text{ mm} \times 8500 \text{ mm}$ steel strand cables are installed symmetrically on either side of the roof centerline at a spacing of $2500 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$.

(3) Metal shed support

Metal sheds are made of 11# mining I-beam steel, with an erection spacing of 800 mm. Adjacent metal sheds are connected by 7 round steel connecting rods, and the roof and both ribs are filled with semi-circular wooden backing plates.

Interaction Characteristics between Support and Surrounding Rock

To investigate the mechanical response of roadway surrounding rock in burnt rock zones under different support systems, UDEC simulations were conducted for three support conditions: (1) unsupport, (2) bolt-cable support, and (3) RAC system. The analysis focused on stress distribution, deformation characteristics, and fracture development in the surrounding rock. The parameters used in the simulation were determined according to the engineering analogy method, and combined with mine grouting practice and related research [13–15] coal mine roadways under complex conditions were divided into five types, for each type the deformation and damage characteristics of rocks surrounding roadways were analyzed. The recent developments of roadway support technologies were introduced abroad, based on the experiences of supports for deep and complex roadways from Germany, the United States and Australia. The history and achievements of roadway support technologies in China were detailed, including rock bolting, steel supports, grouting reinforcement and combined supports. Four typical support and reinforcement case studies were analyzed, including a high stressed roadway 1,000 m below the surface, a roadway surrounded by severely weak and broken rocks, a chamber surrounded by weak and broken rocks, and a roadway with very soft and swelling rocks. Based on studies and practices in many years, rock bolting has become the mainstream roadway support form in China coal mines, and steel supports, grouting reinforcement and combined supports have also been applied at proper occasions, which have provided reliable technical measures for the safe and high effective construction and mining of underground coal mines.”;”container-title”:”International Journal of Coal Science & Technology”;”DOI”:”10.1007/

s40789-014-0043-0", "ISSN": "2095-8293, 2198-7823", "issue": "3", "journalAbbreviation": "Int J Coal Sci Technol", "language": "en", "page": "261-277", "source": "DOI.org (Crossref). The final selection was that after grouting, the rock mass cohesion increased by 20%, tensile strength increased by 5 kPa, and friction angle increased by 5°.

As shown in **Fig. 8**, under unsupport conditions, the maximum principal stress zones in the roadway ribs and roof-to-floor extend deeply into the surrounding rock, forming pronounced stress concentrations. After applying rock bolt-cable support, the range of these concentrations decreases moderately, although local tensile stress zones persist. Combined support, integrating bolts, cables, metal sheds, and grouting, fills fractures and pores, enhances the integrity of the surrounding rock, and markedly reduces both the magnitude and extent of the principal stress concentrations.

The extent of tensile stress zones varies significantly under different support schemes, following the sequence: unsupport > bolt-cable support > RAC system. The corresponding peak tensile stresses are 1.14 MPa, 0.85 MPa, and 0.81 MPa, respectively. Compared with the unsupport and bolt-cable schemes, the RAC system reduces the maximum tensile stress by 29% and 5%, demonstrating a notable improvement in roadway stability.

Deviatoric stress is a critical factor governing plastic failure in the rock mass (**Fig. 9**). Under unsupport and bolt-cable support conditions, the deviatoric stress value in the shallow surface

zone is relatively low (< 1.2 MPa), with high stress concentrated within the rib interior. In the unsupport case, peak deviatoric stress occurs at a distance of 2.59 m from the rib surface, whereas bolt-cable support causes this peak to migrate inward to 1.44 m from the rib. Under the RAC system, the deviatoric stress distribution shows an asymmetric form, with the maximum value concentrated at 0.83 m from the roadway floor corner, and the stress peak value is about 3.7 MPa. The failure range of shallow rock mass is significantly reduced, and roadway stability is obviously improved.

As shown in **Fig. 10** under unsupport conditions, the roof suffers from severe separation and inverted V-shaped failure due to tensile stress. Bolt-cable support restricts fracture propagation and interlayer sliding to a certain extent, but potential shear fractures still exist. The RAC system scheme significantly inhibits fracture development in the roof and ribs, roof displacement is obviously reduced, and the separation phenomenon is basically eliminated.

The axial force distribution in support components under different support schemes is illustrated in **Fig. 11**. Under bolt-cable support, the mean axial force in bolts is 33.5 kN, approximately 28% of the breaking load, while the mean axial force in cables is 49 kN, approximately 18% of the breaking load, indicating low utilization. Under RAC system, the mean bolt axial force increases to 58 kN, approximately 48% of the yield load, and the mean cable axial force increases to 84 kN, approximately 32% of the

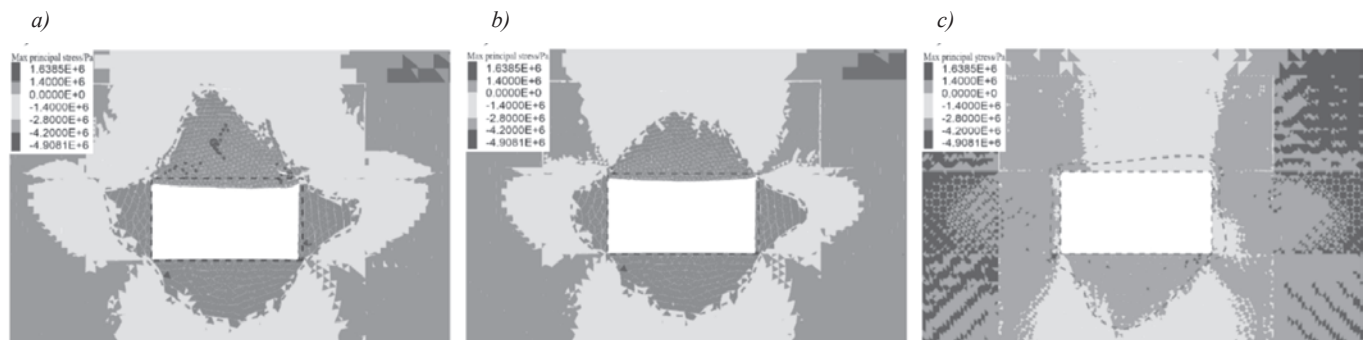


Fig. 8. Principal stress distribution under different support conditions: (a) unsupport; (b) bolt-cable support; (c) RAC system

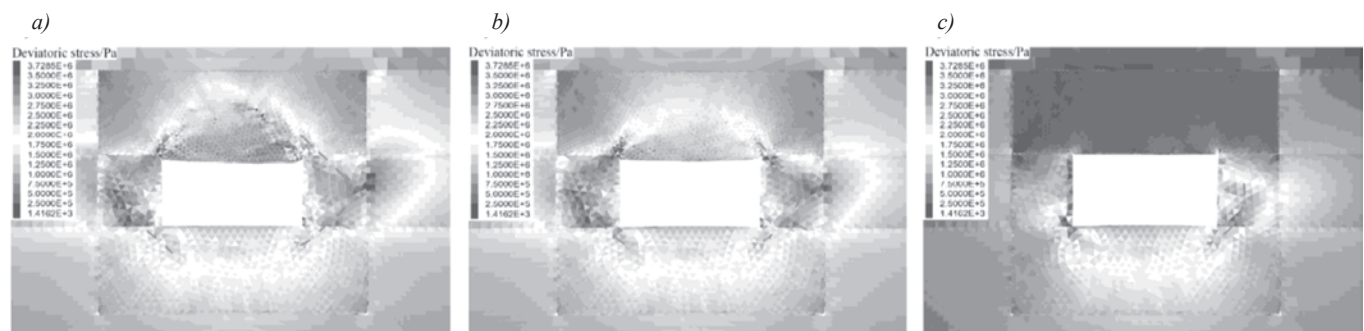


Fig. 9. Deviatoric stress distribution under different support conditions: (a) unsupport; (b) bolt-cable support; (c) RAC system

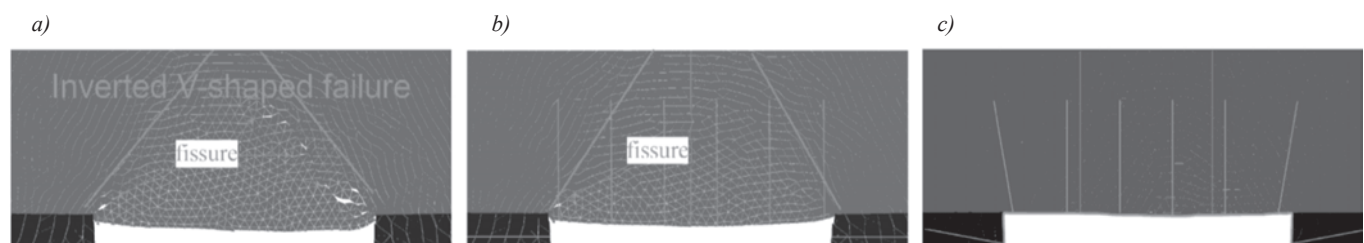


Fig. 10. Roof fracture development under different support conditions: (a) unsupport; (b) bolt-cable support; (c) RAC system

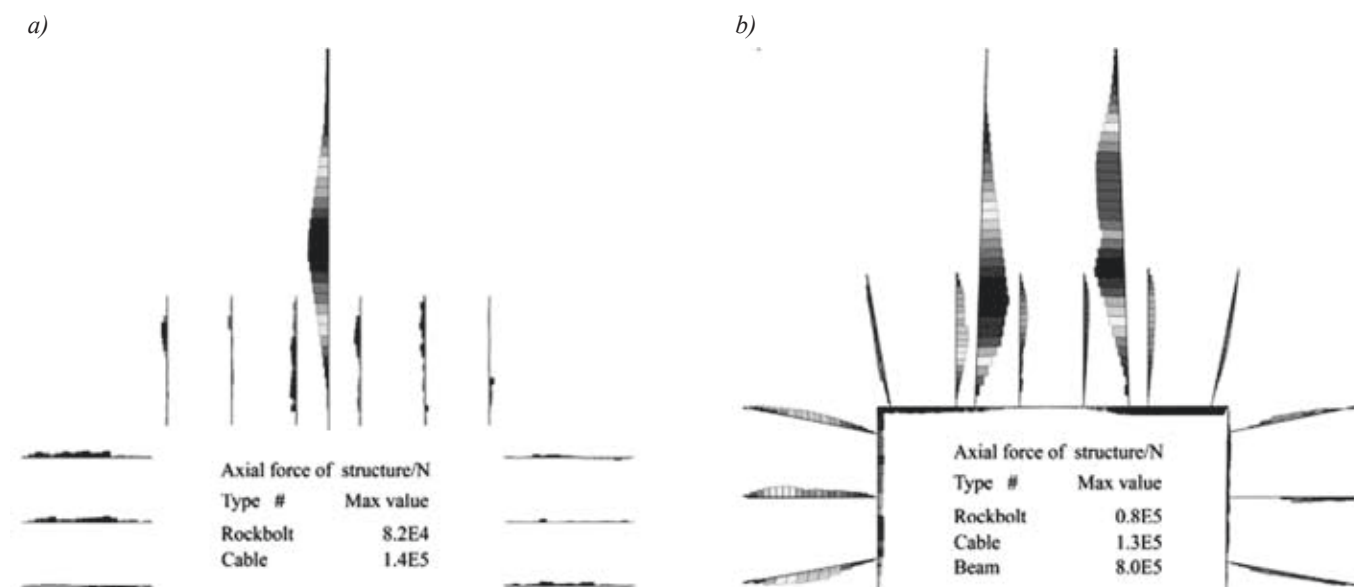


Fig. 11. Axial force distribution in support components: (a) bolt-cable support; (b) RAC system

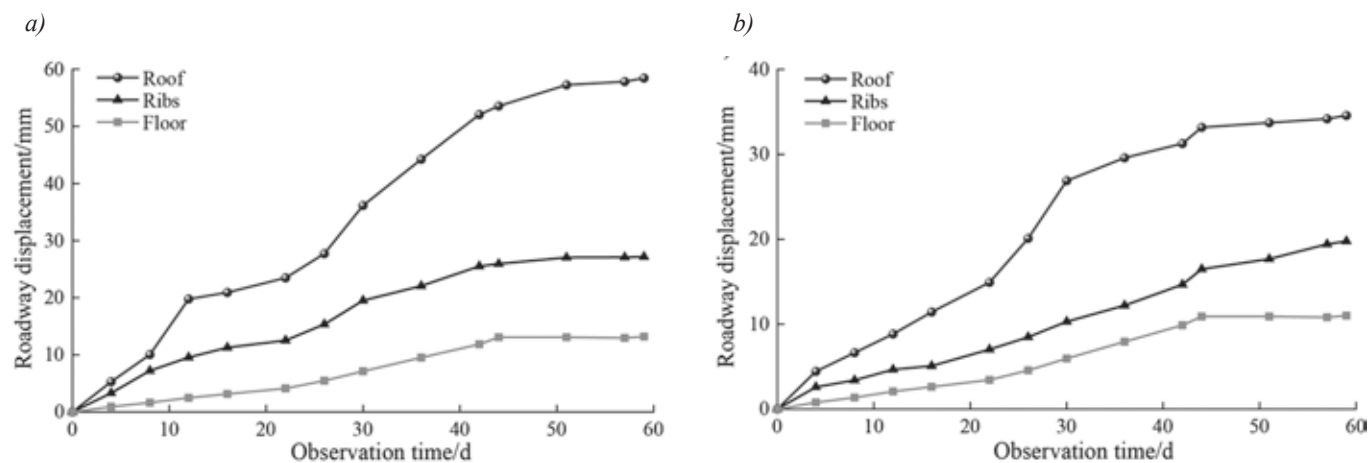


Fig. 12. Roadway convergence monitoring results: (a) central burnt rock zone; (b) burnt rock zone boundary

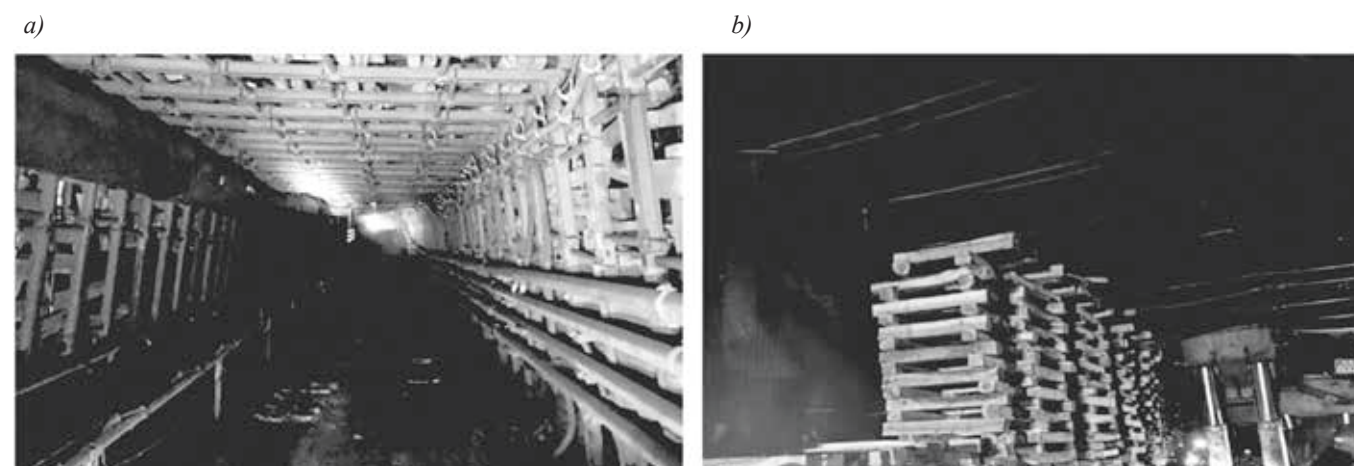


Fig. 13. Surrounding rock control performance: (a) overall cross-sectional condition; (b) condition in advance zone

yield load. These results demonstrate that under weak and fractured surrounding rock conditions, the support components are in a good stress state and effectively play the role of anchoring and controlling the surrounding rock.

Field Testing and Performance Evaluation

To verify the field applicability of the RAC system, convergence monitoring stations were installed following

excavation of the 3202 return airway. Each station comprises four measuring points located at the midpoints of the roof, floor, and both ribs to monitor roof-to-floor and rib-to-rib convergence.

Following two months of continuous monitoring (Fig. 12), the results indicate that the area affected by burnt rock, cumulative roof-to-floor convergence reaches approximately 71 mm, while rib-to-rib convergence is approximately 27 mm. At 40 days post-

excavation, both roof-to-floor and rib-to-rib deformations to be stable, with minimal convergence increment.

Field observations presented in **Fig. 13** show that the cross-section shape of the 3202 return airway under RAC system remains intact, with surrounding rock deformation controlled within acceptable engineering limits. Even in the advance zone ahead of the working face, no significant deformation is observed, and roof and rib deterioration is substantially mitigated.

Comprehensive analysis demonstrates that the RAC system proves highly effective in burnt rock affected zones. This technology enhances rock mass integrity through grouting consolidation, while bolts, cables and metal shed support collectively establish a support system providing surface confinement and deep reinforcement.

Conclusion

1. Due to high temperature thermal alteration, the surrounding rock exhibits loose structure with extensive fracture development, resulting in significantly reduced uniaxial

compressive strength and geological strength index. Both theoretical calculations and numerical simulations indicate that the loosening zone around roadways in burnt rock areas extends to 3.1~4.2 m, with rock mass stability substantially compromised.

2. The theoretical calculation results are consistent with UDEC numerical simulation and borehole observations measured data, verifying the applicability and reliability of the equivalent radius method under burnt rock conditions, which can provide theoretical reference for roadway surrounding rock stability evaluation. 27 mm.

3. The proposed RAC system effectively controls the burnt rock roadway. The grouting improves rock mass integrity, while the bolts, cables and metal sheds components form a multi-level coordinated structure. Field monitoring shows that the convergence of roof-to-floor and ribs are 71 mm and respectively, the surrounding rock deformation is effectively controlled, and the long-term safe and stable support of roadway in burnt rock area is achieved.

REFERENCES

1. Rexiti Y., Lei H., Fan Y., et al. Characteristics and transformations of mineral phases in burnt rocks. *Coal Geol. Explor.* 2024; 52 (8): 14. <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.11.0739>.
2. Jia Z.-Z., Li H.-J., Li W., et al. Study on blasting fragmentation mechanism of burnt rock in open-pit coal mine. *Sci. Rep.* 2024; 14 (1): 5034. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55802-2>.
3. Yang Y., Zhao C., Di Y., et al. Geological exploration of coal mine burnt rock and waterlogged area boundary based on transient electromagnetic and high-density electrical resistivity. *Sci. Rep.* 2024; 14 (1): 5105. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55496-6>.
4. Kang H. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China. *Chin. J. Rock Mech. Eng.* 2021; 40 (1): 1–30. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0072>.
5. Wang H., Chen M., Zhang X. Twenty years development and prospect of rapid coal mine roadway excavation in China. *J. China Coal Soc.* 2024; 49 (2): 1199–1213.
6. Kang H., Yang J., Jiang P., et al. Theory, technology and application of grouted bolting in soft rock roadways of deep coal mines. *Int J Miner Metall Mater.* 2024; 31 (7): 1463–1479. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2906-8>.
7. Wang S., Liu L., Zhu M., et al. Scientific problems and technology of the integration of “excavation-backfill-retention” of Section Coal Pillar and Mining Roadway. *J. China Coal Soc.* 2024; 49 (8): 3291–3315. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0592>.
8. Xue J., Shi L., Wang H., et al. Water abundance evaluation of a burnt rock aquifer using the AHP and entropy weight method: a case study in the Yongxin coal mine, China. *Environ. Earth Sci.* 2021; 80 (11): 417. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09703-6>.
9. Xie H., Li J., Dong Y., et al. Fast Fisher discrimination of water-rich burnt rock based on DC electrical sounding data. *Mine Water Environ.* 2021; 40 (2): 539–546. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00747-x>.
10. Zhang B., Xiao F., Jin W. Burnt coal field detection via magnetic exploration. *Environ. Earth Sci.* 2023; 82 (7): 160. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10843-0>.
11. Huang H., Sun Q., Guo C., et al. Investigating the evolution of pore space and magnetization rate of rocks under the effect of coal fire burning. *Environ. Earth Sci.* 2024; 83 (2): 81. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11396-y>.
12. Yuan Y., Liu Z., Zhu C., et al. The effect of burnt rock on inclined shaft in shallow coal seam and its control technology. *Energy Science & Engineering.* 2019; 7 (5): 1882–1895. <https://doi.org/10.1002/ese3.398>.
13. Kang H. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review. *Int J Coal Sci Technol.* 2014; 1 (3): 261–277. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0043-0>.
14. Yang T., Liu J., Luo J., et al. Study on instability mechanism of soft rock roadway and pressure-relief bolt-grouting support technology. *Sci. Rep.* 2023; 13 (1): 20667. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47451-8>.
15. Kang H., Yang J., Jiang P., et al. Theory, technology and application of grouted bolting in soft rock roadways of deep coal mines. *Int J Miner Metall Mater.* 2024; 31 (7): 1463–1479. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2906-8>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Лин Лу –

аспирант, Китайский университет горного дела и технологий (Пекин), 100083, г. Пекин, Китай; e-mail: linlu_cumtb@163.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.11.2025

Поступила после рецензирования: 30.11.2025

Принята к публикации: 10.12.2025

ABOUT THE AUTHOR

Lin Lu -

PhD Candidate, China University of Mining and Technology (Beijing), 100083, Beijing, China; e-mail: linlu_cumtb@163.com

Article info

Received: 14.11.2025

Revised: 30.11.2025

Accepted: 10.12.2025

Влияние ультразвуковой обработки рудной пульпы с частотой 22 кГц на рост кинетики бактериально-химических процессов

А. А. Аврейтевич, В. А. Иодис✉

ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН),
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

✉ iodisva@mail.ru

Резюме. Проведен анализ исследований ультразвукового воздействия для интенсификации процессов обогащения минерального сырья, активации, регенерации и переработки отработанных катализаторов. Исследование показало, что ультразвуковая обработка благодаря создаваемым кавитации, радиационному давлению, акустическим потокам действительно позволяет существенно ускорить процессы обогащения под средством удаления поверхностных отложений, оксидных пленок, диспергации частиц. Проведено экспериментальное исследование процесса бактериально-химического выщелачивания сульфидных кобальт-медно-никелевых руд с использованием предварительной ультразвуковой обработки рудной пульпы и без нее для увеличения кинетики процесса, извлечения целевых металлов. Исследование показывает, что использование ультразвукового излучения ($22 \text{ кГц} \pm 1,65$, 23 Вт/см^2 , $1\ 800 \text{ с}$) способствует увеличению скорости процесса: по никелю (Ni) – в 1,83 раза, по меди (Cu) – в 2,83 раза, по кобальту (Co) – в 3,86 раза, способствует росту извлечения: по Ni – в 2,18 раза, по Cu – в 4,02 раза, по Co – в 2,96 раза. Эксперименты показали, что бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при отношении Т:Ж рудной пульпы 1:3, отношении Т:Ж пульпы бактериальной суспензии 1:5 целесообразно для получения богатых по составу полиметаллических растворов никеля, меди и кобальта. В целях интенсификации извлечения целевых металлов необходимо продолжить исследования процесса бактериально-химического выщелачивания при различных плотностях рудной пульпы, пульпы бактериальной суспензии, различной продолжительности ультразвукового воздействия, частоты излучения, его различных интенсивностях.

Ключевые слова: ультразвуковое излучение, сульфидные руды, активация рудной пульпы, оксидные пленки, биогидрометаллургическая переработка, бактериально-химическое выщелачивание, никель, медь, кобальт

Для цитирования: Аврейтевич А.А., Иодис В.А. Влияние ультразвуковой обработки рудной пульпы с частотой 22 кГц на рост кинетики бактериально-химических процессов. Маркшейдерия и недропользование. 2025;25(6):40-45. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-40-45>.

The effect of ultrasonic treatment of ore pulp at 22 kHz on the increase in the kinetics of bacterial-chemical processes

A. A. Avreitsevich, V. A. Iodis✉

Research Geotechnological Center,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (RGC FEB RAS),
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

✉ iodisva@mail.ru

Abstract. An analysis of studies of ultrasonic impact for intensification of mineral raw material enrichment processes, for activation, regeneration and recycling of spent catalysts was conducted. The study showed that ultrasonic treatment, thanks to the cavitation, radiation pressure, and acoustic flows it creates, can significantly accelerate enrichment processes by removing surface deposits, oxide films, and dispersing particles. An experimental study was conducted on the process of bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ores using preliminary ultrasonic treatment of ore pulp and without it to increase the kinetics of the process and increase the extraction of target metals. The study shows that the use of ultrasonic radiation ($22 \text{ kHz} \pm 1.65$, 23 W/cm^2 , 1800 s) helps

to increase the process speed – for nickel by 1.83 times, for copper by 2.83 times, for cobalt by 3.86 times, and helps to increase the extraction – for Ni by 2.18 times, for Cu by 4.02 times, for Co by 2.96 times. Experiments have shown that bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore with a solid:liquid ratio of ore pulp of 1:3 and a solid: liquid ratio of bacterial suspension pulp of 1:5 is suitable for obtaining rich polymetallic solutions of nickel, copper and cobalt. In order to intensify the extraction of target metals, it is necessary to continue research into the process of bacterial-chemical leaching at different densities of ore pulp, bacterial suspension pulp, different durations of ultrasonic exposure, radiation frequencies, and its different intensities.

Keywords: ultrasonic radiation, sulfide ores, activation of ore pulp, oxide films, biohydrometallurgical processing, bacterial-chemical leaching, nickel, copper, cobalt

For citation: Avreitsevich A.A., Iodis V.A. The effect of ultrasonic treatment of ore pulp at 22 kHz on the increase in the kinetics of bacterial-chemical processes. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):40-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-40-45>.

Введение

Сокращение ресурсов высококачественных руд цветных металлов, обострение в мире экологических проблем делают актуальным развитие экологически безопасных (природоподобных) биогидрометаллургических технологий в горноперерабатывающей промышленности. Биогидрометаллургические способы переработки рудного сырья получают распространение благодаря большей экологичности и относительно высокой рентабельности. Камчатский регион располагает значительным минерально-сырьевым потенциалом. Здесь в последние годы активно развиваются горнодобывающие предприятия. Однако применяемые биогидрометаллургические технологии имеют относительно низкую кинетику бактериально-химических процессов окисления руд. В настоящее время ультразвуковое излучение все чаще используется для увеличения скорости процессов в технологиях переработки минерального сырья.

Цель работы: исследование влияния предварительной ультразвуковой обработки пульпы сульфидных руд с частотой 22 кГц, интенсивностью излучения 23 Вт/см², продолжительностью 1 800 с на повышение кинетики бактериально-химических процессов, рост извлечения целевых металлов.

Анализ предыдущих исследований

В России исследования ультразвукового воздействия для интенсификации процессов обогащения минерального сырья проводили и проводят такие организации, как ВНИИХТ, МИСиС, ИПКОН РАН, ИГД ДВО РАН, ООО «Центр ультразвуковых технологий», БТИ АлтГТУ, НИГТЦ ДВО РАН [1, 2]. Исследования в данном направлении нашло применение для удаления оксидных пленок полевого шпата, стекольных кварцевых песков, Al₂O₃, SiC, В и других перед гидрометаллургическими процессами. Эксперименты проводились в диапазоне частот 15–44 кГц, с достаточно низкими интенсивностями – 2–8 Вт/см², однако исследования в разном диапазоне частот, продолжительностей и интенсивностей для одного объекта не проводились [3–6]. В мировой науке основными направлениями исследований является изучение влияния ультразвукового воздействия на разрушения минеральных агрегатов, оксидных пленок, образование дефектов кристаллических решеток руд, а также определение оптимальных параметров ультразвукового воздействия, снижение энергозатрат. Например, результаты исследований [7] показали успешное удаление оксидных пленок с поверхности Ni под действием ультразвука, что ускорило процесс получения высокочастотного NiSO₄. Увеличение скорости процесса выщелачивания сурьмы из упорной золотосодержащей руды в щелочном сульфиде натрия при ультразвуковом воздействии

было достигнуто [8]. Положительные результаты по использованию ультразвука для обогащения никелевой руды, в частности удаления серпентина с поверхности пентландита, получены [9]. Значительное увеличение извлечения золота при выщелачивании карбонизированным циануратом натрия в условиях ультразвуковой активации достигнуто в работе [10]. Имеются данные [11] об интенсификации процесса кислотного выщелачивания циркония из эвдиалитового концентрата ультразвуком за счет образования ювенильной поверхности минеральных частиц. Ультразвуковая обработка (22–44 кГц, до 13 Вт/см²) отработанных катализаторов позволяет их активировать и регенерировать под средством удаления оксидных пленок, поверхностных отложений, измельчения частиц катализаторов [12–17].

Анализ литературных данных показывает, что благодаря воздействию ультразвукового излучения на рудную пульпу происходит разрушение оксидных пленок на поверхности частиц, образование ювенильной поверхности, поверхностных дефектов, дисперсия частиц. Это позволяет значительно увеличить кинетику процессов технологий переработки минерального сырья.

Материал и методы исследования

Характеристика руды. В экспериментах использована окисленная сульфидная кобальт-медно-никелевая руда месторождения Шануч (Камчатский край, Россия). Месторождение входит в Шанучское рудное поле и расположено в средней части северного склона горы Верхняя Тхонжа (Срединный хребет Центральной Камчатки). Рудные тела месторождения сложены сульфидными медно-никелевыми рудами. Исходное содержание металлов в образцах руды: 6,08 % Ni; 1,2 % Cu; 0,17 % Co. Образцы руды размером 10–12 мм измельчались на планетарной шаровой мельнице марки «Pulverisette-5», компании Fritsch GmbH до 100 % контрольного класса – 0,05 мм. Затем измельченную руду разделяли путем классификации на ситовом грохоте марки «Analysette-3», модели PRO. Для образования рудной пульпы в эксперименте использовалась дистиллированная вода с плотностью 996 кг/м³ при 20 °С, pH = 5,39–5,5, Eh = 95 мВ.

Характеристика микроорганизмов. Доминирующими видами в пробе автохтонной смешанной бактериальной культуры были *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans* и *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. Накопление автохтонной культуры в количестве 438,5 г проводили 15 суток в асептических условиях в шейкер-инкубаторе при температуре 30 °С.

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка, представленная на рисунке 1, включала три блока: блок 1 использовался для ультразвуковой обработки (актива-

ции) рудной пульпы; блок 2 использовался для накопления и активации автохтонной культуры; блок 3 использовался для бактериально-химического выщелачивания.

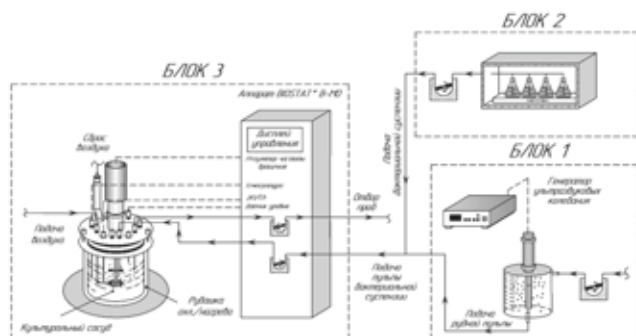


Рис. 1. Экспериментальная установка /
Fig. 1. Experimental setup

Блок 1 состоял из герметичного стального реактора с погруженным в него ультразвуковым излучателем. Размеры, частота колебаний и интенсивность излучения, создаваемые генератором ультразвуковых колебаний в реакторе, представлены в работе [1]. Максимальная потребляемая ультразвуковым генератором мощность составляла 400 Вт при диапазоне ее регулирования от 30 до 100 %. Блок 2 состоял из шейкер-инкубатора для культивирования бактериальной культуры и насоса, подающего бактериальную суспензию (693 г) смесь (инокулята и питательной среды (без железа) массой 254 г) к блоку 3. Блок 3 состоял из двух культуральных сосудов марки UniVessell Glass, 2L и двух аппаратов марки BIOSTAT* B-MO.

Условия эксперимента

Первый этап. Истертую стерилизованную сульфидную руду взвешивали (333 г), смешивали с дистиллированной водой в соотношении по массе (Т:Ж) 1:3 и насосом подавали в ультразвуковой реактор при интенсивности 23 Вт/см², продолжительность 1 800 с, откуда активированная рудная пульпа направлялась на смешение с бактериальной суспензией в культуральном сосуде (рис. 1), образуя пульпу бактериальной суспензии в соотношении Т:Ж – 1:5.

Второй этап эксперимента, продолжительностью 14 суток, проводился в культуральных сосудах № 1 (C1) и № 2 (C2) при температуре 30 °С и частоте примешивания 300 об/мин. Загрузка бактериальной суспензии с рудной пульпой, активированной ультразвуком, осуществлялась в C1. Загрузка бактериальной суспензии с рудной пульпой, не обработанной ультразвуком, осуществлялась в C2. Один раз в сутки осуществляли контроль параметров процесса.

Аналитические методы исследования. Величины pH и Eh измеряли с помощью портативного pH-метр/ионометр Mettler-Toledo Seven Compact S220. Прямой подсчет клеток осуществляли при помощи камеры Горяева. Численность клеток подсчитывали с помощью микроскопа на тринокулярном микроскопе марки «Микромед-3». Концентрации закисного Fe(II) и окисного железа Fe(III) в жидкой фазе пульпы определяли методом комплексонометрического титрования трилоном Б. Определение Ni, Cu и Co в жидкой и твердой фазах осуществляли атомно-абсорбционным методом при помощи спектрофотометра «6300 Shimadzu».

Результаты и обсуждение исследования

Проведенный эксперимент можно разделить на три этапа. На первом этапе процесса, длительностью 2 суток, микроорганизмы в обоих сосудах C1 и C2 прикреплялись к твердой поверхности минерала посредством контактного механизма с выделением внеклеточных полимерных соединений [18, 19], и, как следствие, количество планктонных клеток в жидкой фазе пульпы уменьшалось. На первом этапе процесса выщелачивание Ni, Cu, Co проходило химическим путем за счет H₂SO₄, изначально присутствующей в питательной среде, что согласуется с исследованиями [20]. На данном этапе существенных различий между экспериментами с использованием ультразвуковой активации рудной пульпы и без нее нет. Водородный показатель пульпы бактериальной суспензии, как и концентрация Fe(II) в ней, увеличивались, окислительно-восстановительный потенциал и концентрация Fe(III) уменьшались (рис. 2, 3). В соответствии с исследованиями в работе [21] для данного этапа характерно прямое бактериально-химическое выщелачивание.

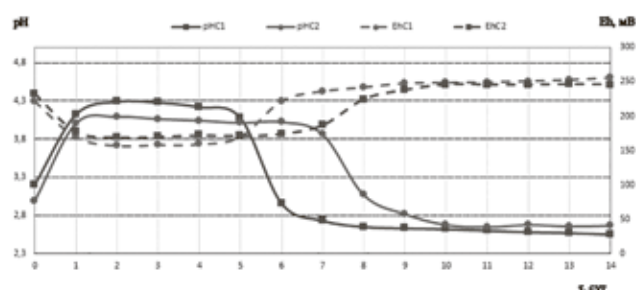


Рис. 2. Изменение pH, Eh пульпы бактериальной суспензии /
Fig. 2. Change in pH and Eh of bacterial suspension pulp

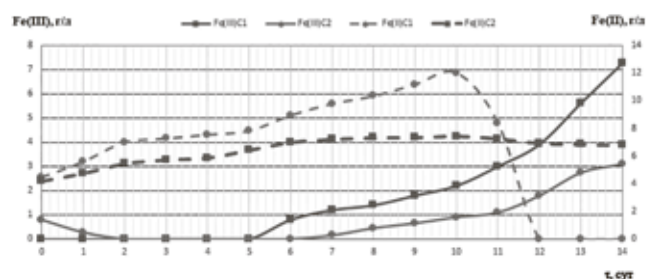


Рис. 3. Изменение концентрации Fe(III), Fe(II) пульпы бактериальной суспензии /
Fig. 3. Change in Fe(III) and Fe(II) concentrations of bacterial suspension pulp

На втором этапе эксперимента в сосуде C1, продолжительностью 3 суток, скорости выщелачивания были низкие: 112 мг/л·сутки – Ni; 9,3 мг/л·сутки – Cu; 0,67 мг/л·сутки – Co, что согласуется с фазой роста бактерий, их адаптацией к новым условиям, снижением активности размножения (рис. 4). Концентрация Fe(II) постепенно увеличивалась, значения pH (4,08–4,28) и Eh (158,3–169,9 мВ) почти не менялись. Концентрация Fe(III) была равна нулю. В C2 второй этап эксперимента имел продолжительность 5 суток. Показатели процесса на данном этапе вели себя аналогично показателям эксперимента в C1, однако концентрация Fe(II) была ниже на 0,8 г/л, pH – 3,86–4,06, Eh – 170–186,8 мВ, а скорости выщелачивания составили: 80,5 мг/л·сутки – Ni; 6,8 мг/л·сутки – Cu; 0,185 мг/л·сутки – Co.

В ходе третьего этапа в обоих культуральных сосудах

происходит экспоненциальный рост биомассы, а выщелачивание целевых металлов происходит биологическим путем. Для третьего этапа в соответствии с работами [21, 22] характерно кооперативное бактериально-химическое выщелачивание. Для С1 этап продолжался 9 суток (6–14-е сутки), для С2 – 7 суток (8–14-е сутки).

Изменения pH, Eh во времени пульпы бактериальной суспензии в сосудах С1 и С2 свидетельствуют о различной скорости и кинетики процессов выщелачивания (рис. 2). В сосуде С1 с 6-х суток происходило полное окисление закисного железа до окисного железа с одновременным ростом концентрации суммарного железа и количества бактерий. В сосуде С2 с 8-х суток до конца эксперимента этого не произошло. Количество бактерий и концентрация Fe(III) в сосуде С1 составили $0,356 \times 10^7$ кл/мл, 7,249 г/л, тогда как в С2 максимальная концентрация Fe(III) достигла значения 3,1 г/л, а количество бактерий – $0,26 \times 10^7$ кл/мл. Данные эксперимента свидетельствуют, что в культуральном сосуде №1 процессы окисления были более интенсивными.

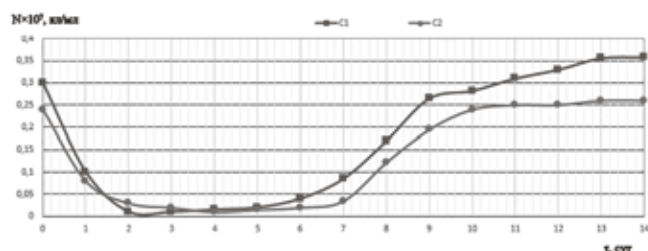


Рис. 4. Изменение численности бактериальной культуры пульпы бактериальной суспензии /
Fig. 4. Change in the number of bacterial culture of the pulp of bacterial suspension

Динамика роста микробной популяции отражает изменение количества только планктонных клеток в жидкой фазе

пульпы и не дает представления о микроорганизмах, прикрепленных к поверхности руды и также участвующих в ее выщелачивании [23]. Тем не менее сопоставление рисунков 2–4 позволяет проследить тесную взаимосвязь между развитием бактериальной биомассы и активностью окислительно-восстановительных процессов в пульпе.

Выводы

Результаты исследования показывают, что бактериально-химическое выщелачивание с использованием предварительной ультразвуковой активации рудной пульпы проходит с большей средней скоростью: в 1,83 раза – по Ni; в 2,83 раза – по Cu; в 3,86 раза – по Co, с большим извлечением: в 2,18 раза – по Ni; в 4,02 раза – по Cu; в 2,96 раза – по Co, чем выщелачивание без использования УЗИ. Это можно объяснить разрушением оксидных пленок с минеральных частиц рудной пульпы, образованием ювенильной поверхности, что повысило кинетику процесса.

Заключение

Проведено исследование процесса бактериально-химического выщелачивания сульфидных кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатский край, Россия) с использованием предварительной ультразвуковой обработки рудной пульпы и без нее. Исследование проводилось с целью увеличения кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания, увеличения извлечения Ni, Cu, Co.

Исследование показывает, что бактериально-химическое выщелачивание с использованием воздействия ультразвукового излучения ($22 \text{ кГц} \pm 1,65$, 23 Вт/см^2 , 1800 с) на рудную пульпу способствует увеличению скорости процесса: по Ni – в 1,83 раза, по Cu – в 2,83 раза, по Co – в 3,86 раза, способствует росту извлечения: по Ni – в 2,18 раза, по Cu – в 4,02 раза, по Co – в 2,96 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Иодис В.А. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023; 81-87. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.13>.
Iodis V.A. Laboratory reactor for ultrasonic treatment of cobalt-copper-nickel ore pulp. *Mining Journal*. 2023; 12: 81-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.13>.
- Трухин Ю.П., Иодис В.А. Разработка укрупненного проточного каскадного бактериально-химического реактора с УЗИ- и СВЧ-активацией для бактериально-химической переработки кобальт-медно-никелевых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; S19: 147-158. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_147.
Trukhin Yu.P., Iodis V.A. Development of a large-scale flow-through cascade bacterial-chemical reactor with ultrasound and microwave activation for bacterial-chemical processing of cobalt-copper-nickel ores. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; S19: 147-158. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_147.
- Патент РФ № 2061066, 05.12.1993. Шестаков В.И., Нешков А.И., Волков В.П. Способ выщелачивания металлов из руд и устройство для его осуществления. 1996.
Patent of the Russian Federation No. 2061066, 05.12.1993. Shestakov V.I., Neshkov A.I., Volkov V.P. Method for leaching metals from ores and device for its implementation. 1996. (In Russ.).
- Хмельев В.Н., Барсуков Р.В., Барсуков А.Р. и др. Ультразвуковой технологический аппарат с пятью рабочими инструментами различного диаметра для проведения научных исследований. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2022; 4 (44): 106-109.
Khmelev V.N., Barsukov R.V., Barsukov A.R., et al. Ultrasonic technological apparatus with five working tools of different diameters for conducting scientific research. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2022; 4 (44): 106-109. (In Russ.).
- Подкаменный Ю.А., Кадырбекова Э.А. Теория и практика применения ультразвуковых воздействий в процессах обогащения рудного и нерудного сырья. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского*. 2021; 24: 172-179. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2021.172>.
Podkamenny Yu.A., Kadyrbekova E.A. Theory and practice of using ultrasonic effects in the beneficiation of ore and non-metallic raw materials. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky*. 2021; 24: 172-179. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2021.172>.
- Патент РФ № 2018134376, 28.09.2018. Секисов А.Г., Хрунина Н.П., Прохоров К.В., Рассказова А.В. Способ извлечения благородных металлов из руд и концентратов. 2019. Бюл. № 16.

- Russian Federation Patent No. 2018134376, September 28, 2018. Sekisov A.G., Khrunina N.P., Prokhorov K.V., Rasskazova A.V. Method for extracting precious metals from ores and concentrates. 2019. Bulletin No. 16. (In Russ.).
7. Li H., Li S., Peng J., et al. Ultrasound augmented leaching of nickel sulfate in sulfuric acid and hydrogen peroxide media. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018; 40: 1021-1030. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.031>.
 8. Hu Y., Guo P., Wang S., Zhang L. Leaching Kinetics of Antimony from Refractory Gold Ore in Alkaline Sodium Sulfide under Ultrasound. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020; 164: 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.029>.
 9. Lu J., Wang N., Yuan Z., et al. The effects of ultrasonic wave on heterogeneous coagulation and flotation separation of pentlandite-serpentine. *Minerals Engineering*. 2022; 188: 107828. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107828>.
 10. Gui Q., Fu L., Hu Y., et al. Oxidative pretreatment of refractory gold ore using persulfate under ultrasound for efficient leaching of gold by a novel eco-friendly lixiviant: Demonstration of the effect of particle size and economic benefits. *Hydrometallurgy*. 2023; 221: 106110. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106110>.
 11. Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. и др. Механизм влияния комбинированных энергетических воздействий на интенсификацию выщелачивания циркония и редкоземельных элементов из эвдиалитового концентрата. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017; 5: 105-112. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20170512>.
Chanturia V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., et al. Mechanism of influence of combined energy impacts on the intensification of leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate. *Physical and Technical Problems of Mineral Resource Development*. 2017; 5: 105-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRI20170512>.
 12. Патент РФ № 2080921, 10.06.1997. Сульман Э.М., Сульман М.Г., Матвеева В.Г. и др. Способ регенерации палладиевого катализатора гидрирования. 1997.
Russian Federation Patent No. 2080921, 10.06.1997. Sulman E.M., Sulman M.G., Matveeva V.G., et al. Method for regenerating palladium hydrogenation catalyst. 1997. (In Russ.).
 13. Муллакаев М.С., Асылбаев Д.Ф., Оганян Г.Б. и др. Ультразвуковая интенсификация процесса каталитического окисления меркаптанов. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2010; 9: 39-41.
Mullakaev M.S., Asylbaev D.F., Oganyan G.B., et al. Ultrasonic intensification of the process of catalytic oxidation of mercaptans. *Oil refining and petrochemistry*. 2010; 9: 39-41. (In Russ.).
 14. Oza R., Shah N., Patel S. Recovery of nickel from spent catalysts using ultrasonication-assisted leaching. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2011; 86 (10): 1276-1281. <https://doi.org/10.1002/jctb.2649>.
 15. Feng C.L., Zhang C., Yuan S.H., et al. Sustainable recovery of surface-deposited oils and valuable metals from uncashed spent hydroprocessing catalysts. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 338: 130564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130564>.
 16. Vyas S., Ting Y. Effect of ultrasound on bioleaching of hydrodesulphurization spent catalyst. *Environmental Technology & Innovation*. 2019; 14: 100310. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.004>.
 17. Иодис В.А. Активация, регенерация и переработка отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (3): 61-65. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.
Iodis V.A. Activation, regeneration, and recycling of spent catalysts using ultrasonic treatment. *Mine surveying and subsurface use*. 2025; 25 (3): 61-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.
 18. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., et al. (Bio)chemistry of bacterial leaching – direct vs. indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001; 59 (2-3): 159-175. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00180-8).
 19. Rodriguez Y., Ballester A., Blazquez M.L. et al. New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy*. 2003; 71: 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00174-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00174-9).
 20. Левенец О.О. Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы. *Вестник ДВО РАН*. 2014; 4: 96-100.
Levenets O.O. Bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore at different pulp densities. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014; 4: 96-100. (In Russ.).
 21. Tributsch H. Direct vs indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001; 59: 177-185.
 22. Кузякина Т.И., Хайнасова Т.С., Левенец О.О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2008; 2 (12): 76-85.
Kuzyakina T.I., Khainasova T.S., Levenets O.O. Biotechnology of metal extraction from sulfide ores. *Vestnik KRAUNC. Earth Sciences*. 2008; 2 (12): 76-85.
 23. Shen L., Cheng J., Wang J., et al. Biofilm formation and development during the pyrite bioleaching of moderately thermophilic microorganisms. *Hydrometallurgy*. 2023; 222: 106183. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106183>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артём Александрович Аврейцевич – аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), 683002, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация; e-mail: artem-032@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Artem A. Avreitsevich – postgraduate student of the Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (RGC FEB RAS), 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation; e-mail: artem-032@mail.ru

Валентин Алексеевич Иодис –

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Научно-исследовательский геотехнологический
центр Дальневосточного отделения Российской академии
наук (НИИГТЦ ДВО РАН), научный руководитель аспиранта,
683017, г. Петропавловск-Камчатский, Российская
Федерация; e-mail: iodisva@mail.ru

Критерии авторства:

А. А. Аврейцевич – сбор и анализ данных литературных источников, проведение экспериментальных исследований, определение параметров процессов, подготовка текста статьи, включая описательные методики, результатов и выводов, оформление таблиц и графиков, визуализация данных и корректность их анализа. В. А. Иодис – разработка концепции исследования, постановка целей и задач, научное руководство исследованием, консультации по методологии и интерпретации данных, участие в интерпретации результатов и их научном обосновании, рецензирование и редактирование текста статьи, внесение правок и дополнений, обеспечение научной строгости текста.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.11.2025

Поступила после рецензирования: 29.11.2025

Принята к публикации: 07.12.2025

Valentin A. Iodis –

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Research
Geotechnological Center; Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences (RGC FEB RAS), postgraduate student's
supervisor, 683017, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian
Federation; e-mail: iodisva@mail.ru

Contribution:

A. A. Avreitsevich – collection and analysis of data from literary sources, conducting experimental studies, determining process parameters, preparing the text of the article, including descriptive methods, results and conclusions, designing tables and graphs, visualizing data and ensuring the correctness of their analysis. V. A. Iodis – development of the research concept, setting goals and objectives, scientific supervision of the research, consultations on methodology and data interpretation, participation in the interpretation of the results and their scientific justification, reviewing and editing the text of the article making edits and additions, ensuring the scientific rigor of the text.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 17.11.2025

Revised: 29.11.2025

Accepted: 07.12.2025

К условиям применения выщелачивания металлов

В. И. Голик^{1✉}, В. Х. Дзапаров¹, С. Г. Страданченко²,

Ю. В. Дмитрак³, С. А. Масленников⁴

¹ ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ)», г. Владикавказ,

Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет», г. Новочеркасск,

Российская Федерация

³ ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова»

Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

⁴ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал ДГТУ), г. Шахты, Российская Федерация

✉ v.i.golik@mail.ru

Резюме. Дефицит отраслей отечественной промышленности в металлах может быть минимизирован или преодолен путем освоения новых перспективных технологий их добычи из потерянных и считающихся недоступными для традиционной технологии запасов минерального сырья. Цель статьи состоит в детализации условий эффективного применения вариантов технологии с выщелачиванием металлов из руд на основе экспериментально полученных лабораторных и промышленных исследований параметров извлечения металлов в рамках единого производственного комплекса. Методы исследования включают в себя обобщение материалов выполненных исследований, критический анализ с применением приемов математико-статистической обработки результатов исследований, моделирование возможных вариантов подземного, скважинного, кучного выщелачивания, выщелачивания в мельницах-активаторах и др., а также инженерное прогнозирование. Определены оптимальные условия применения технологий разработки выщелачиванием, обеспечивающие надежный режим движения раствора для создания оптимальных условий для окисления рудных минералов. Даны результаты анализа элементов механизма выщелачивания, в том числе определения неоднородности выщелачиваемых массивов по скорости распространения волн напряжений. Приведены результаты моделирования отдельных элементов процесса выщелачивания в модели и рудном массиве с анализом амплитуды сигналов. Представлены результаты исследования поглощения упругих колебаний методом межскважинного акустического прозвучивания. Рекомендуемые положения и выводы статьи могут быть востребованы в процессах модернизации производства на действующих предприятиях и оптимизации проектов разработки новых месторождений.

Ключевые слова: выщелачивание, извлечение металлов, анализ, моделирование, движение растворов, окисление минералов, руды

Для цитирования: Голик В.И., Дзапаров В.Х., Страданченко С.Г., Дмитрак Ю.В., Масленников С.А. К условиям применения выщелачивания металлов *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):46-51. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-46-51>.

To the conditions of application of metal leaching

V. I. Golik^{1✉}, V. Kh. Dzaparov¹, S. G. Stradanchenko², Yu. V. Dmitrak³, S. A. Maslennikov⁴

¹ North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (GTU), Vladikavkaz, Russian Federation

² South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

³ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁴ Institute of Service and Entrepreneurship Branch, DSTU, Shakhty, Russian Federation

✉ v.i.golik@mail.ru

Abstract. The shortage of domestic industries in metals can be minimized or overcome by developing new promising technologies for their extraction from lost and considered inaccessible to traditional technology reserves of mineral raw materials. The purpose of the article is to detail the conditions for the effective use of variations of the technology with metal leaching from ores based on experimentally obtained laboratory and industrial studies of metal extraction parameters within the framework of a single production

complex. The research methods include an overview of the materials of the performed studies, critical analysis using mathematical and statistical processing of research results, modeling of possible options for underground, borehole, heap leaching, leaching in activator mills, etc., as well as engineering forecasting. Optimal conditions for the use of leaching development technologies have been determined, providing a reliable mode of solution movement to create optimal conditions for the oxidation of ore minerals. The results of the analysis of the elements of the leaching mechanism are given, including the determination of the heterogeneity of the leached arrays by the propagation velocity of stress waves. The results of modeling individual elements of the leaching process in the model and the ore massif with an analysis of the amplitude of the signals are presented. The results of a study of the absorption of elastic vibrations by the method of downhole acoustic sounding are presented. The recommended provisions and conclusions of the article may be in demand in the processes of modernization of production at existing enterprises and optimization of projects for the development of new deposits.

Keywords: leaching, metal extraction, analysis, modeling, movement of solutions, oxidation of minerals, ores

For citation: Golik V.I., Dzaparov V.Kh., Stradanchenko S.G., Dmitrak Yu.V., Maslennikov S.A. To the conditions of application of metal leaching. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-46-51>.

Введение

В результате изменения стратегии добычи и переработки минерального сырья металлургические комплексы России испытывают дефицит в рудах, что определяет необходимость упрочнения минерально-сырьевой базы с учетом современности [1–3]. Резервом увеличения производства руд является освоение считавшихся ранее непригодными для разработки участков эксплуатируемых месторождений выщелачиванием [4–6].

Выбор схемы подземного выщелачивания производится на основе определенных экспериментально параметров оптимизации процессов извлечения металлов в рамках единого производственного комплекса [7–9].

Среди исходных данных приоритетную роль играет выбор схемы движения выщелачивающего раствора реагента: фильтрационной, инфильтрационной и пульсационно-статической.

В расчетах оценивается возможность интенсификации процессов выщелачивания химическим и физическим воздействием, а также подача пиритного концентрата или пирролизита, способствующих образованию серной кислоты. Проникновение выщелачивающего раствора сквозь руду с естественной проницаемостью или искусственной проницаемостью определяет показатели растворения металлов с поверхности куска и включает в себя основные процессы: транспорт веществ к поверхности вещества, изменение фазового состояния и перемещение растворенных металлов.

Основные условия применения технологии выщелачивания включают в себя возможность дробления руд для обеспечения проницаемости их для растворов реагентов, несклонность к самовозгоранию, высокое содержание сульфидов и низкое содержание карбонатов.

К настоящему времени накоплен опыт выщелачивания металлов в добывающих отраслях, позволяющий делать выводы о перспективах развития новых технологий [10–12].

Технологии выщелачивания заслуживают расширения ареала использования, поскольку являются одновременно и ресурсо- и природо-сберегающими [13–15]. Они подлежат контролю методами шахтной геофизики [16–17].

Развитие методов выщелачивания металлов из недоступных для традиционных технологий запасов является неотъемлемым элементом программ совершенствования горного производства [18–21].

Цель исследований: детализация требований к условиям эффективного применения технологии с выщелачиванием.

Методы исследования

Методы исследования включают в себя обобщение материалов, критический анализ с применением приемов математико-статистической обработки, моделирование возможных вариантов подземного скважинного выщелачивания.

На основе результатов опытно-промышленных и эксплуатационных работ и комплексной модели «Геотехнология полиэлементных руд» создается модель отработки месторождения.

Методом итерационного моделирования сравниваются варианты добычи металлов и создаются комбинированные варианты, позволяющие увеличить обмен веществ в ходе реакций.

Результаты исследований

Параметры системы разработки выщелачиванием должны соответствовать режиму пленочно-капельного движения раствора и создавать оптимальные условия для окисления рудных минералов.

Зависимость извлечения металлов в раствор от продолжительности выщелачивания характеризуется графиком (рис. 1).

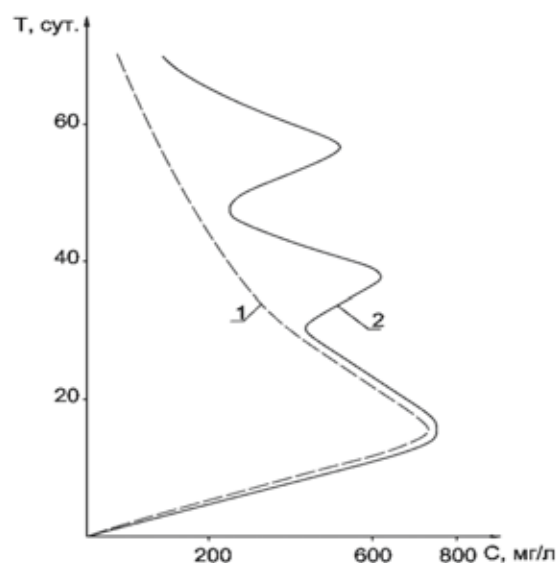


Рис. 1. Зависимость извлечения металлов от времени выщелачивания: 1 – по традиционной технологии; 2 – по технологии с интенсификацией процессов /

Fig. 1. Dependence of metal extraction on the time of leaching: 1 – according to traditional technology; 2 – according to technology with intensification of processes

Количество переведенных в раствор металлов:

$$Q_0 = T_0 g_0,$$

где T_0 – время контакта раствора с рудой.

Производительность блока выщелачивания:

$$Q_m = S V c \gamma,$$

где S – выщелачиваемая площадь блока, м²;

V – скорость выщелачивания, м/с;

c – содержание металла в руде, %;

γ – объемный вес руды, кг/м³.

Для определения неоднородности выщелачиваемых массивов исследуют зависимость скорости звуковых упругих волн от плотности и крупности руд (рис. 2).

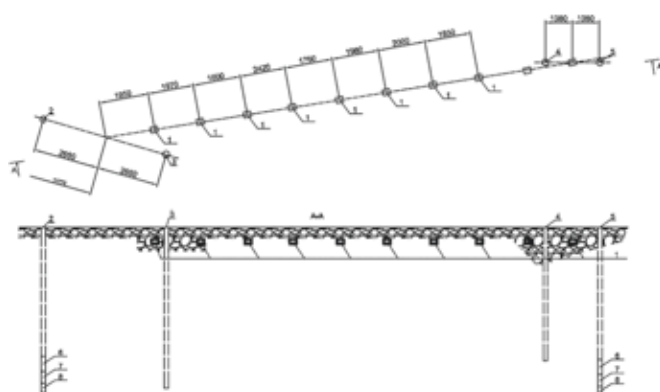


Рис. 2. Схема исследования неоднородности массива /
Fig. 2. The scheme of studying the heterogeneity of the array

Генерируемые взрыванием заряда взрывчатых веществ (ВВ) волны напряжений регистрировали осциллографами и датчиками. Произведено два взрыва в скважине № 4 на глубинах 6,7 и 4,7 м и один – в скважине № 1 на глубине 3,0 м.

Вместе с зарядом ВВ в скважине размещали датчики отметки момента взрыва. По времени движения волн и расстоянию от заряда до датчика определяли скорость распространения волн и судили об однородности среды. Например, для руд с коэффициентом разрыхления $K_p = 1,6 \dots 1,7$ скорость распространения волн напряжений составила 507 м/с (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1
Скорость распространения звуковых волн /
The speed of propagation of sound waves

Скважина / Boreholes	Датчик / Sensor	Расстояние, м / Distance, m	Время, с / Time, s	Скорость, м/с / Speed, m/s
№ 1 длина 6,7 м	20	7,0	0,013	538
	18	7,6	0,014	540
	16	8,4	0,0151	556
№ 2 длина 4,7 м	20	5,3	0,012	442
	18	5,8	0,013	446
	16	6,7	0,018	372
№ 3 длина 3,0 м	2	4,8	0,008	600
	7	8,0	0,015	533
	10	10,7	0,0214	500

Те же параметры, исследованные на модели с масштабom крупности материала 1:50, приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2
Крупность породных частиц /
Size of rock particles

В отвале / In the dump		В модели / In the model	
Класс, мм / Class, mm	Выход класса, % / Class Output, %	Класс, мм / Class, mm	Выход класса, % / Class Output, %
0 – (-25)	22	0 – (-0,5)	24
(+25)–(-50)	23	(+0,5)–(-1,0)	20
(+50)–(-100)	21	(+1,0)–(-2,0)	22
(+100)–(-150)	19	(+2,0)–(-3,0)	23
(+150)–(-200)	15	(+3,0)–(-4,0)	11

Для модели с коэффициентом разрыхления 1,2...1,3 и диаметром куса 2...4 мм скорость распространения фронта волн напряжений составила 640 м/с (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3
Скорость распространения звуковых волн в модели /
The speed of propagation of sound waves in the model

Эксперимент / Experiment	Датчик / Sensor	Расстояние, м / Distance, m	Время, с / Time, s	Скорость, м/с / Speed, m/s
№ 1	1	0,32	0,0006	533
	3	0,91	0,0015	606
	5	1,4	0,0022	645
№ 2	1	0,3	0,0005	600
	3	0,9	0,0014	652
	5	1,5	0,0025	600
№ 3	1	0,3	0,0004	705
	3	0,9	0,0013	750
	5	1,5	0,0022	680
№ 4	1	0,3	0,0004	695
	3	0,9	0,0013	682
	5	1,5	0,0026	571
№ 5	1	0,3	0,0005	600
	3	0,9	0,0015	600
	5	1,5	0,0028	535

Оценку фильтрационной неоднородности руд производили на основе измерения амплитуды сигналов (рис. 3).

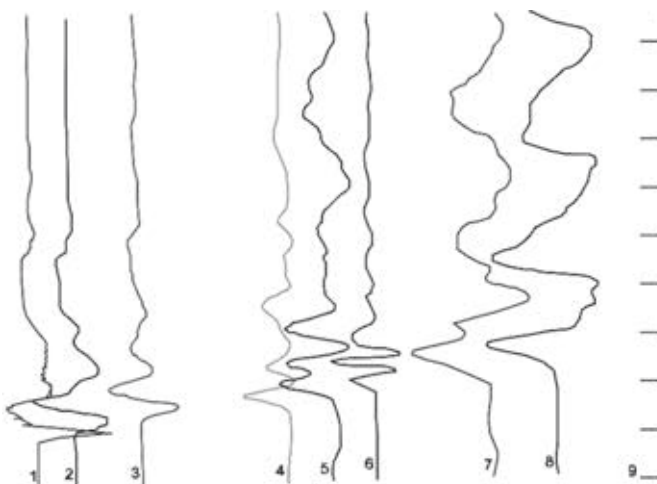


Рис. 3. Оциллограмма скорости распространения звуковых волн:
1–8 – запись датчиков; 9 – запись отметки времени /
Fig. 3. Waveform of sound wave propagation velocity: 1–8 – sensor recording;
9 – time stamp recording

Поглощение упругих колебаний в зависимости от плотности среды измеряли методом межскважинного акустического прозвучивания. Измеряя амплитуду звука, выявляли структурную неоднородность массива (рис. 4).

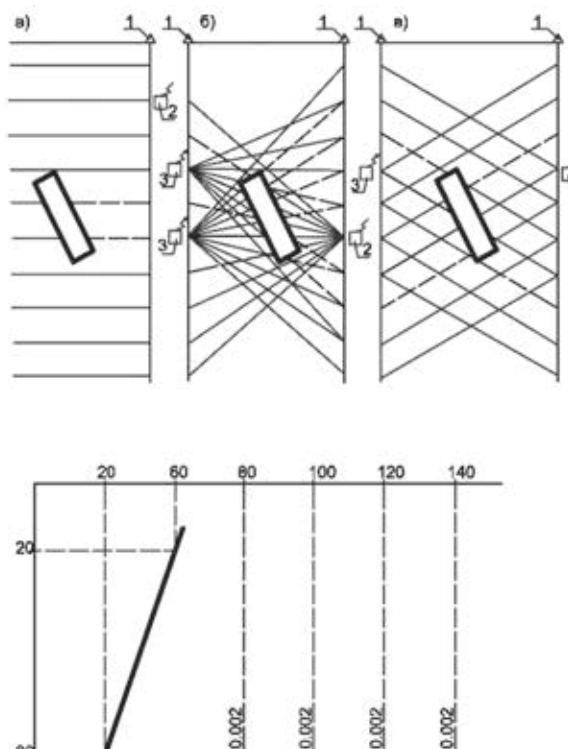


Рис. 4. Схема прозвучивания: сверху – схема съемок; внизу – обработка данных /
Fig. 4. The sounding scheme: above is the filming scheme; below is the data processing;
Sounding scheme: a – shooting scheme; b – data processing

Значения уровней звукового давления L_s приводили к абсолютным значениям L относительно нуля шкалы анализатора спектра:

$$L = L_s + \delta_s^1;$$

$$L = L_s + \delta_s^2,$$

где δ_s^1 98 дБ - поправка приведения при коэффициенте усиления звукоприемника при $K_y = 10000$;
 δ_s^2 118 дБ – при $K_y = 1000$.

Методика исследований, определяющих эффективность выщелачивания металлов, позволяет снизить затраты на ее реализацию и в конечном счете расширить диапазон применения этой ресурсо- и природосберегающей технологии.

Выводы

1. Эффективность применения технологии с выщелачиванием повышается при учете экспериментально полученных параметров извлечения металлов в рамках производственного комплекса.
2. Интегрирующим условием применения технологий разработки подземным выщелачиванием является создание оптимальных условий для окисления рудных минералов растворами реагентов.
3. Элементы механизма выщелачивания детализируются путем определения неоднородности выщелачиваемых массивов по скорости распространения волн напряжений, моделирования процесса изменения фазового состояния модели и рудного массива, а также поглощения упругих колебаний при межскважинном акустическом прозвучивании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., и др. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. *Вектор ГеоНаук*. 2019; 2 (1): 9-18. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10002>.
Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., et al. The mineral resource base of non-ferrous metallurgy in Russia. *Vector of GeoSciences*. 2019; 2 (1): 9-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10002>.
2. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
3. Каплунов Д.Р., Юков В.А., Лавенков В.С. О влиянии годовой производительности на эффективность методов подземного выщелачивания медных руд. *ГИАБ*. 2017; 10: 5-11.
Kaplunov D.R., Yukov V.A., Lavenkov V.S. On the effect of annual productivity on the effectiveness of methods of underground leaching of copper ore. *GIAB*. 2017; 10: 5-11. (In Russ.)
4. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020; 12 (2(44)): 283-290. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>.
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountainous territories*. 2020; 12 (2 (44)): 283-290. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>.
5. Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development. V.I. Lakshmanan and all. (eds.). *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. Switzerland, 2016: 257-280. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0_18.
6. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых. *Маркиейдерский вестник*. 2015; 1: 10-15
Lyashenko V.I. Environmental protection technologies for the development of complex-structured mineral deposits. *Surveying Bulletin*. 2015; 1: 10-15. (In Russ.).
7. Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., et al. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 69-74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>.
8. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А. и др. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов. *Горный журнал*. 2017; 12: 46-51. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>.
Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., et al. Improving the economic efficiency of mining enterprises by involving technological geo-resources in the exploitation. *Mining Journal*. 2017; 12: 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>.

9. Авдеев П.Б., Овешников Ю.М. Опыт применения кучного выщелачивания на рудных карьерах Забайкалья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014; 4: 15-25.
Avdeev P.B., Oveshnikov Yu.M. The experience of using heap leaching in the ore quarries of Transbaikalia. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 4: 15-25. (In Russ.)
10. Minagawa M., Hisatomi S., Kato T., et al. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018; 29 (3): 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.11.03>.
11. Аренс В.Ж., Гридин О.М., Дербунувич Н.Н. и др. Опыт подземного выщелачивания желваковых фосфоритов. *Горный журнал*. 2016; 6: 56-63. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.06.06>.
Arens V.Zh., Gridin O.M., Derbunovich N.N., et al. Experience of underground leaching of nodular phosphorites. *Mining Journal*. 2016; 6: 56-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.06.06>.
12. Морозов А.А., Смагин А.П., Безносков Г.Ф. и др. Технико-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля. *Горный журнал*. 2013; 8-2.
Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., et al. Technical and economic assessment of the effectiveness of block underground leaching of uranium from poor ores of the Streltsovsky ore field. *Mining Journal*. 2013; 8-2. (In Russ.)
13. Голик В.И., Полухин О.Н. Природоохранные геотехнологии в горном деле. Белгород, 2013.
Golik V.I., Polukhin O.N. Environmental geotechnologies in mining. Belgorod, 2013. (In Russ.)
14. Chen G., Chen J., Peng J. Effect of mechanical activation on structural and microwave absorbing characteristics of high titanium slag. *Powder Technology*. 2015; 286: 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.021>.
15. Абрамов Б.Н., Еремин О.В., Филенко Р.А., и др. Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений Восточного Забайкалья. *Геосферные исследования*. 2020; 2: 64-67. <https://doi.org/10.17223/25421379/15/5>.
Abramov B.N., Eremin O.V., Filenko R.A., et al. Assessment of the potential ecological danger of natural and man-made complexes of ore deposits in Eastern Transbaikalia. *Geospheric research*. 2020. No. 2. pp. 64-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/15/5>.
16. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комашченко В.И. и др. Геофизические методы контроля руд при выщелачивании. *Геофизика*. 2018; 1: 85-91.
Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., Burdzieva O.G. Geophysical methods of ore control during leaching. *Geophysics*. 2018; 1: 85-91. (In Russ.).
17. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., et al. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016; 8 (1): 46-51. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51>.
18. Валиев Н.Г., Головырин С.С., Макаров В.В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных систем). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017; S23: 134-139.
Valiev N.G., Golovyurin S.S., Makarov V.V. On the issue of using artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (the problem of solving problems of modern mining production using multi-agent systems. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; S23: 134-139. (In Russ.)
19. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л. и др. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. *Горный журнал*. 2017; 11: 77-83. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.14>.
Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., et al. Theory and practice of combined physico-chemical and energy effects on geomaterials and aqueous suspensions. *Mining Journal*. 2017; 11: 77-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.14>.
20. Моргоева А.Д., Манджиева С.С., Киричков М.В., и др. Исследование моделей машинного обучения для оценки влияния угольных горно-энергетических предприятий на экосистемы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024; 16 (3): 1130-1143. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1130-1143>.
Morgoeva A.D., Mandzhieva S.S., Kirichkov M.V., et al. Research of machine learning models for assessing the impact of coal mining and energy enterprises on ecosystems. *Sustainable development of mountainous territories*. 2024; 16 (3): 1130-1143. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1130-1143>.
21. Кожиев Х.Х., Босиков И.И. Комплексный показатель перспективности разработки участков месторождений полезных ископаемых. *Горный журнал*. 2017; 2: 30-32. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.05>.
Kojiev Kh.Kh., Bosikov I.I. A comprehensive indicator of the prospects for the development of mineral deposits. *Mining magazine*. 2017; 2: 30-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.05>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Иванович Голик –

д-р техн. наук, профессор, Геофизический институт
Владикавказского научного центра РАН, 362002, г.
Владикавказ, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@yail.ru

Вячеслав Хаматканович Дзапаров –

канд. техн. наук, доцент Северо-Кавказского горно-
металлургического института (ГТУ), 362021, г.
Владикавказ, Российская Федерация; e-mail: dzapa64@
yandex.ru

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir I. Golik –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Geophysical Institute of the
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of
Sciences, 362002, Vladikavkaz, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@yail.ru

Vyacheslav H. Dzaparov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the North Caucasus
Mining and Metallurgical Institute (GTU), 362021, Vladikavkaz,
Russian Federation; e-mail: dzapa64@yandex.ru

Сергей Георгиевич Страданченко –

д-р техн. наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета, 346428, г. Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: ssg72@mail.ru

Sergey G. Stradanchenko –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the South Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: ssg72@mail.ru

Юрий Витальевич Дмитрак –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, начальник отдела моделирования и управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

Yuri V. Dmitrak –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Modeling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

Станислав Александрович Масленников –

канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал ДГТУ), 346500, г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: mail@sssu.ru

Stanislav A. Maslennikov –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction and Technosphere Safety, Institute of Service and Entrepreneurship (branch), DSTU, 346500, Shakhty, Russian Federation; e-mail: mail@sssu.ru

Вклад авторов:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Contribution:

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

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.08.2025
Поступила после рецензирования: 30.11.2025
Принята к публикации: 06.12.2025

Article info

Received: 08.08.2025
Revised: 30.11.2025
Accepted: 06.12.2025

Способ модернизации карьерного самосвала «Белаз-75306» для работы в газодизельном режиме

Г. М. Дубов^{1✉}, А. Г. Кульпин¹, А. В. Черниченко¹, С. А. Нохрин²

¹ ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово, Российская Федерация

² ООО «ТехноЭко», г. Прокопьевск, Российская Федерация
✉ dubovgm@kuzstu.ru

Резюме. Анализируется современное состояние проблемы, связанной с востребованностью и результативностью применения технологии частичного замещения дизельного топлива сжиженным природным газом (СПГ) на карьерной технике. Отмечается, что именно в классе тяжелых карьерных самосвалов СПГ рассматривается как наиболее перспективный энергоноситель, способный конкурировать с традиционными нефтяными моторными топливами. Использование СПГ в качестве моторного топлива способствует снижению негативного воздействия карьерного автотранспорта на окружающую среду, повышению энергетической эффективности перевозки горной массы и сокращению эксплуатационных затрат, связанных с удельным расходом топлива. В этой связи подчеркивается актуальность исследований, направленных на выбор оптимальных конструктивных и компоновочных решений для размещения и интеграции криогенного оборудования на карьерных самосвалах. В работе детально рассмотрена новая технологическая схема установки криогенного топливного резервуара на карьерный самосвал «БелАЗ-75306» (грузоподъемность 220 т). Приведены варианты модернизации конструктивных элементов машины, обеспечивающие возможность безопасного и эффективного размещения криогенного оборудования на ее борту.

Ключевые слова: карьерный самосвал, сжиженный природный газ, газодизельный режим работы, газомоторное топливо, криогенная бортовая топливная система

Для цитирования: Дубов Г.М., Кульпин А.Г., Черниченко А.В., Нохрин С.А. Способ модернизации карьерного самосвала «Белаз-75306» для работы в газодизельном режиме. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):52-58. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-52-58>.

Method for modernization the Belaz-75306 mining dump truck for operation in gas-diesel mode

G. M. Dubov^{1✉}, A. G. Kulpin¹, A. V. Chernichenko¹, S. A. Nokhrin²

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

² "TekhnoEco" Limited Liability Company, Prokopyevsk, Russian Federation
✉ dubovgm@kuzstu.ru

Abstract. This paper analyzes the current state of the problem related to the demand and effectiveness of using technology for partial replacement of diesel fuel with liquefied natural gas (LNG) in quarry equipment. It is emphasized that the transition to gas-diesel mode does not require extensive and labor-intensive modernization of diesel engines, which makes this technology economically viable and technologically accessible for mining companies. It is noted that it is in the class of heavy quarry dump trucks that LNG is considered the most promising energy source capable of competing with traditional petroleum motor fuels. The use of LNG as a motor fuel contributes to reducing the negative impact of quarry vehicles on the environment, increasing the energy efficiency of rock transportation, and reducing operating costs associated with specific fuel consumption. In this regard, the relevance of research aimed at selecting optimal design and layout solutions for the placement and integration of cryogenic equipment on quarry dump trucks is emphasized. The paper provides a detailed review of a new technological scheme for installing a cryogenic fuel tank on a BelAZ-75306 dump truck (load capacity 220 tons). Options for upgrading the structural elements of the machine are presented, ensuring the safe and effective placement of cryogenic equipment on board.

Keywords: mining dump truck, liquefied natural gas, gas-diesel mode of operation, gas engine fuel, cryogenic onboard fuel system

For citation: Dubov G.M., Kulpin A.G., Chernichenko A.V., Nokhrin S.A. Method for modernization the Belaz-75306 mining dump truck for operation in gas-diesel mode. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):52-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-52-58>.

Введение

Ежегодный рост мирового потребления минерального сырья формирует перед научным сообществом и промышленностью комплекс актуальных задач, связанных с повышением эколого-экономической эффективности процессов его добычи. Эффективность открытой добычи минеральных ресурсов в значительной степени определяется видом применяемого технологического транспорта. На сегодняшний день ключевым видом транспорта, обеспечивающим перевозку горной массы, являются тяжелые карьерные самосвалы [1].

В настоящее время сжиженный природный газ признан экономически целесообразным альтернативным моторным топливом для автотранспортных средств. Его использование возможно без глубокой переработки, за исключением операций по добыче, транспортировке и сжижению [2–5].

Применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива для горно-технологического оборудования рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений. СПГ является существенно более дешевым топливом по сравнению с дизельным. Технология его использования в режиме частичного замещения дизельного топлива не требует сложной и трудоемкой модернизации дизельных двигателей внутреннего сгорания, что обеспечивает ее экономическую целесообразность для карьерных самосвалов. Дополнительными преимуществами применения СПГ являются снижение экологической нагрузки, повышение энергоэффективности транспортировки горной массы и уменьшение затрат на топливо [6–8].

Реализация проектов по производству и потреблению сжиженного природного газа в России находится на начальном этапе становления и развития. Слабое присутствие в России собственных крупнотоннажных технологий сжижения природного газа, нормативно-технической и эксплуатационной документации на криогенное бортовое топливное оборудование ставит российские проекты в зависимость от зарубежных поставщиков технологий, оборудования и сервисных услуг. Недавно принятые технические регламенты, устанавливающие требования к параметрам криогенных бортовых топливных систем, предназначенных для оснащения карьерных самосвалов «БелАЗ», а также сформированный специализированный комплекс технологического оборудования создают фундаментальные предпосылки для дальнейшего развития, тиражирования и промышленного масштабирования отечественных технологий производства и применения сжиженного природного газа в сегменте карьерного технологического транспорта [9–11].

В этих условиях особую значимость приобретают инженерные разработки, направленные на обоснование и выбор рациональных конструктивных решений и схемных конфигураций размещения, компоновки и интеграции криогенного оборудования в структуру карьерной техники. При проектировании таких систем требуется учитывать широ-

кий спектр факторов: горнотехнические ограничения, требования эргономики, особенности технологического цикла и экологические нормативы. Дополнительно необходимо проведение комплексной оценки эксплуатационных характеристик и показателей надежности криогенных систем, что еще более подчеркивает актуальность и научно-практическую значимость обозначенных исследовательских задач [12–14].

Цель работы: разработка методического подхода к обоснованию и реализации рациональной схемы размещения криогенного топливного бака на борту серийного карьерного самосвала «БелАЗ-75306».

Методы исследований

Процесс формирования схемных и конструктивных решений, необходимых для адаптации карьерного самосвала «БелАЗ-75306» к эксплуатации в газодизельном рабочем цикле, выполнялся с использованием программной среды трехмерного инженерного моделирования «КОМПАС-3D».

В качестве обязательного этапа исследования проводилась натурная оценка возможностей интеграции криогенного топливного бака в архитектуру машины, осуществляемая непосредственно на территории автопарков ведущих горнодобывающих предприятий Кузбасса, что позволило объективно установить ограничения компоновочного характера и выявить наиболее рациональные варианты размещения.

Комплекс проектных, аналитических и инженерно-технологических работ реализовывался ООО «ТехноЭко» (г. Прокопьевск, Россия) в тесном взаимодействии с ОАО «БЕЛАЗ» (г. Жодино, Республика Беларусь) и ФГБОУ ВО «КузГТУ» (г. Кемерово, Россия), осуществлявшими научное и конструкторское сопровождение проекта.

Результаты

Известен способ размещения криогенных топливных баков на карьерном самосвале, при котором криогенные емкости устанавливаются на палубе карьерного самосвала «БелАЗ-75131» [15–17].

К недостаткам данного способа относятся:

- значительные ограничения на общий объем устанавливаемых криогенных баков, обусловленные их расположением, вследствие этого увеличивается число заправочных циклов в течение смены, что снижает эффективность технологического цикла транспортировки горной массы;
- необходимость строительства специализированных заправочных площадок непосредственно в зоне горных работ, поскольку размещение баков на палубе требует применения особых технологий заправки (такие мероприятия приводят к существенным дополнительным затратам для предприятия-пользователя газодизельных самосвалов);
- метод рассчитан исключительно на модель «БелАЗ-75131» и ее модификации (грузоподъемностью до 130 т) и предусматривает установку только двух баков суммарным

объемом не более 1 350 л, что делает его неэффективным для карьерных самосвалов более высокой грузоподъемности (220 т и выше), ограничивая производительность процесса транспортировки горной массы.

Известен также способ установки криогенного топливного бака на раме карьерного самосвала «БелАЗ-75139». Данный способ заключается в установке одного криогенного топливного бака непосредственно на правом лонжероне рамы самосвала под кузовом, между передними и задними колесами [18].

К недостаткам указанного способа относятся следующие положения:

- отсутствие в открытом доступе детализированных материалов, описывающих процедуру монтажа, что не позволяет объективно оценить степень технологической сложности, практическую реализуемость данного решения, а также влияние установки криогенного топливного бака на сохранение эксплуатационных параметров карьерного самосвала;

- анализ доступных публикаций свидетельствует, что метод ориентирован преимущественно на модели «БелАЗ-75139» (грузоподъемностью до 130 т) и «БелАЗ-75476» (грузоподъемностью до 45 т), при этом предполагается применение топливных криогенных емкостей сравнительно малого объема, что негативно отражается на производительности технологического процесса перевозки горной массы.

В рамках разработки нового технического решения по установке криогенного топливного бака на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306» (грузоподъемностью до 220 т) были поставлены такие ключевые задачи, как:

- разработка рациональной и технологически эффективной схемы размещения криогенной топливной емкости на правом лонжероне рамы карьерного самосвала серии «БелАЗ-75306», обеспечивающей перевод машины в газодизельный режим работы;

- повышение эксплуатационной надежности, производственной безопасности и удобства обслуживания карьерных самосвалов данной серии при функционировании в газодизельном цикле;

- сокращение трудоемкости монтажных операций, минимизация подготовительных процедур, а также увеличение эффективности технологического процесса транспортировки горной массы при эксплуатации самосвала в условиях газодизельного режима работы.

Разработанное техническое решение поясняется схемами, представленными на рисунках ниже. На рисунке 1 представлен криогенный топливный бак; на рисунке 2 представлена компоновочная схема установки криогенного топливного бака на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»; на рисунке 3 – схема базового размещения стандартного дизельного топливного бака на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»; на рисунке 4 – схема штатного размещения масляного бака и пневмогидроаккумуляторов на левом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»; на рисунке 5 – схема интегрированной установки дизельномасляного бака и пневмогидроаккумуляторов на левом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»; на рисунке 6 – модернизированный стандартный дизельный топливный бак; на рисунке 7 – модернизированный стандартный масляный бак; на рисунке 8 – конструкция дизельномасляного бака.

Предлагаемый способ модернизации предусматривает следующее. Для обеспечения возможности установки монтажной платформы 1 (рис. 1), на которой фиксируется криогенный топливный бак 2, на правом лонжероне 3 рамы 4 (рис. 2) карьерного самосвала «БелАЗ-75306» (далее – самосвал) 5, а также для сохранения полной работоспособности машины первоначально выполняется демонтаж стандартного дизельного топливного бака 6, установленного на правом лонжероне 3 рамы 4 самосвала 5 (рис. 3), а также стандартного масляного бака 7 с левого лонжерона 8 рамы 4 самосвала 5 (рис. 4).

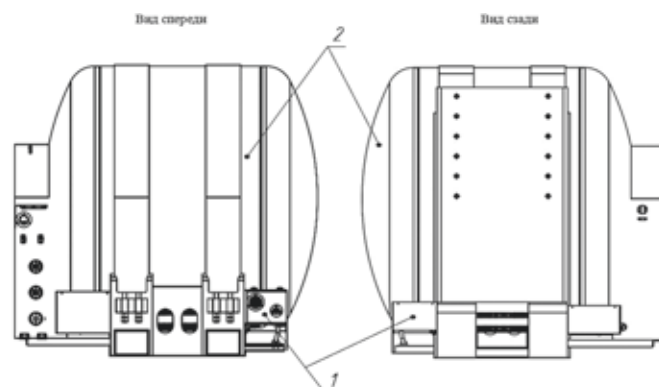


Рис. 1. Криогенный топливный бак: 1 – монтажная платформа; 2 – криогенный топливный бак /

Fig. 1. Cryogenic fuel tank: 1 – mounting platform; 2 – cryogenic fuel tank

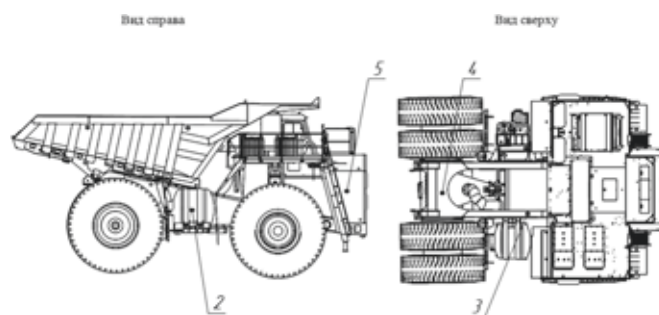


Рис. 2. Компоновочная схема установки криогенного топливного бака на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»: 2 – криогенный топливный бак; 3 – правый лонжерон; 4 – рама; 5 – карьерный самосвал «БелАЗ-75306» /

Fig. 2. Layout scheme for installing the cryogenic fuel tank on the right frame longitudinal member of the BelAZ-75306 mining dump truck: 2 – cryogenic fuel tank; 3 – right spar; 4 – frame; 5 – BelAZ-75306 mining truck

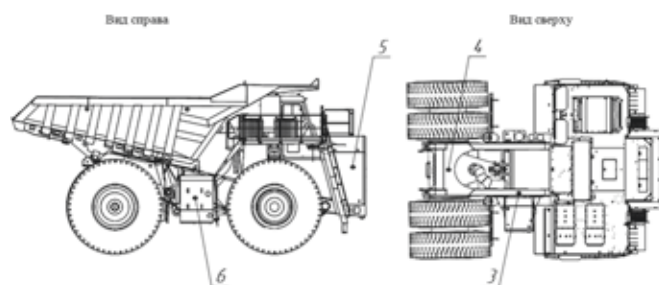


Рис. 3. Схема базового размещения стандартного дизельного топливного бака на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»: 3 – правый лонжерон; 4 – рама; 5 – карьерный самосвал «БелАЗ-75306»; 6 – стандартный дизельный топливный бак /

Fig. 3. Scheme of the basic placement of a standard diesel fuel tank on the right side member of the frame of a BelAZ-75306 mining dump truck: 3 – right spar; 4 – frame; 5 – BelAZ-75306 mining truck; 6 – standard diesel fuel tank

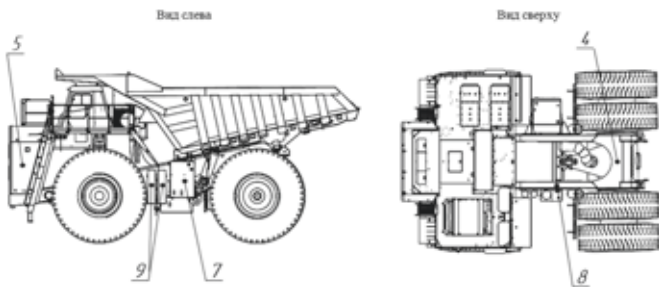


Рис. 4. Схема штатного размещения масляного бака и пневмогидроаккумуляторов на левом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»: 4 – рама; 5 – карьерный самосвал «БелАЗ-75306»; 7 – стандартный масляный бак; 8 – левый лонжерон; 9 – пневмогидроаккумуляторы /

Fig. 4. Standard arrangement scheme of the oil tank and pneumatic-hydraulic accumulators on the left frame longitudinal member of the BelAZ-75306 mining dump truck: 4 – frame; 5 – BelAZ-75306 mining truck; 7 – standard oil tank; 8 – left spar; 9 – pneumatic hydraulic accumulators

Производят перенос на левом лонжероне 8 пневмогидроаккумуляторов 9 по направлению к передней части рамы 4 самосвала 5, на расстояние 600 мм, являющееся достаточным для размещения впоследствии дизельномасляного бака 10, и фиксируют их в данном положении посредством стандартных крепежных изделий (рис. 5). Осуществляют модернизацию стандартного дизельного топливного бака 6, заключающуюся в изготовлении в его правой части технологической ниши 11 (рис. 6), достаточной для последующего размещения в ней модернизированного стандартного масляного бака 7 (рис. 7), монтируют (например, сваркой и стандартными крепежными изделиями) систему ограничителей 12 и 13 с передней и правой стороны, вдоль полученной технологической ниши 11, осуществляют перенос заливной горловины 14 на расстояние 600 мм от левой стороны модернизируемого стандартного дизельного топливного бака 6, датчик максимального уровня топлива и клапан для слива излишек топлива переносят на левую сторону стандартного модернизируемого дизельного бака 6 (позиции не показаны).

Далее осуществляют модернизацию стандартного масляного бака 7 (рис. 7), заключающуюся в удалении с его задней стенки четырех монтажных креплений (позиции не показаны), предусмотренных заводом-изготовителем, всасывающий патрубок 15 переносят на правую боковую стенку модернизируемого стандартного масляного бака 7 и удлиняют его до 618 мм, каналы слива рабочей жидкости 16 переносят на переднюю стенку модернизируемого стандартного масляного бака 7.

Далее в технологическую нишу 11 модернизированного стандартного дизельного топливного бака 6 устанавливают модернизированный стандартный масляный бак 7 и жестко закрепляют его с передней и правой стороны (например, сваркой и стандартными крепежными изделиями) системой ограничителей 12 и 13, а также сверху ограничительной рамой 17 (рис. 8). Далее получившийся дизельномасляный бак 10 устанавливают на левом лонжероне 8 рамы 4 самосвала 5 в месте, где ранее находился стандартный масляный бак 7 и пневмогидроаккумуляторы 9 (см. рис. 5). После этого на правом лонжероне 3 рамы 4 самосвала 5, на место, где изначально был установлен стандартный дизельный топливный бак 6, монтируют крепежную платформу 1 с криогенным топливным баком 2 (рис. 2).

При необходимости на дизельномасляный бак 10 (см. рис. 5), в крайней левой (дизельной) части, может быть смонтирован трап 18, поскольку в процессе эксплуатации может

возникнуть необходимость в техническом обслуживании дизельномасляного бака 10 (рис. 5).

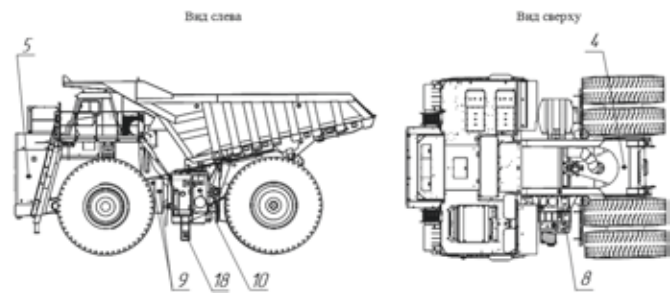


Рис. 5. Схема интегрированной установки дизельномасляного бака и пневмогидроаккумуляторов на левом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»: 4 – рама; 5 – карьерный самосвал БелАЗ-75306; 8 – левый лонжерон; 9 – пневмогидроаккумуляторы; 10 – дизельномасляный бак; 18 – трап /

Fig. 5. Integrated installation scheme of the diesel-oil tank and pneumatic-hydraulic accumulators on the left frame longitudinal member of the BelAZ-75306 mining dump truck: 4 – frame; 5 – BelAZ-75306 mining truck; 8 – left spar; 9 – pneumatic hydraulic accumulators; 10 – diesel oil tank; 18 – ladder

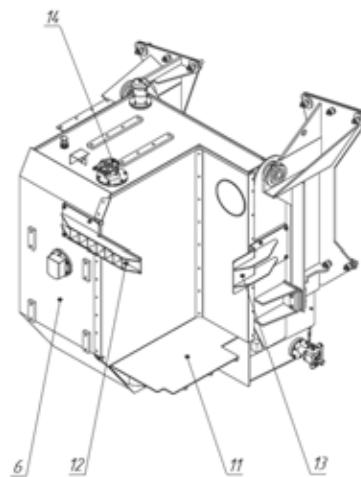


Рис. 6. Модернизированный стандартный дизельный топливный бак: 6 – модернизированный стандартный дизельный топливный бак; 11 – технологическая ниша; 12, 13 – ограничители; 14 – заливная горловина /

Fig. 6. Modernized standard diesel fuel tank: 6 – modernized standard diesel fuel tank; 11 – technological niche; 12, 13 – limiters; 14 – filler neck

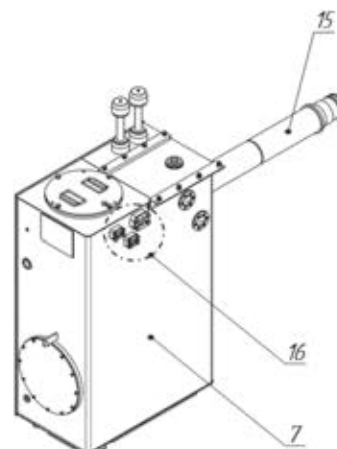


Рис. 7. Модернизированный стандартный масляный бак: 7 – модернизированный стандартный масляный бак; 15 – всасывающий патрубок; 16 – каналы слива рабочей жидкости /

Fig. 7. Modernized standard oil tank: 7 – modernized standard oil tank; 15 – suction pipe; 16 – channels for draining the working fluid

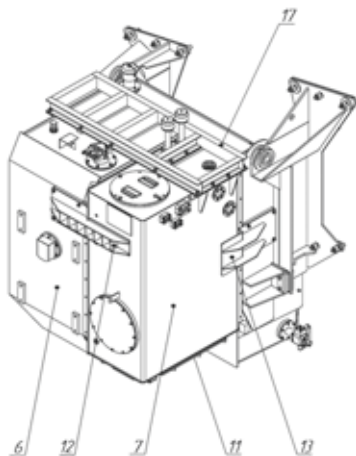


Рис. 8. Конструкция дизельномасляного бака: 6 – модернизированный стандартный дизельный топливный бак; 7 – модернизированный стандартный масляный бак; 11 – технологическая ниша; 12, 13 – ограничители; 17 – ограничительная рама /
Fig. 8. Design of diesel-oil tank: 6 – modernized standard diesel fuel tank; 7 – modernized standard oil tank; 11 – technological niche; 12, 13 – limiters; 17 – limiting frame

Обсуждение

Интеграция криогенного топливного бака осуществляется посредством его установки на специализированную крепежную платформу, фиксируемую на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306». Реализация такого конструктивного подхода обеспечивает значительное упрощение процедуры монтажа криогенного оборудования в пределах существующей компоновки машины, минимизирует объем подготовительных технологических операций и формирует удобный доступ к криогенному топливному баку при выполнении регламентных работ, включая заправку, технический осмотр и сервисное обслуживание.

Помимо этого, выбранная схема размещения обеспечивает возможность прямого визуального мониторинга состояния криогенного топливного бака из рабочей зоны оператора (через правое наружное зеркало заднего вида). Данная особенность конструктивной организации способствует повышению эксплуатационной безопасности при функционировании машины в газодизельном режиме и позволяет своевременно фиксировать и предотвращать потенциально нештатные ситуации.

Комплекс защитных мер, предусмотренных в отношении установленного криогенного топливного бака, реализуется посредством совокупности элементов штатной конструкции, а именно: кузова самосвала, выполняющего роль экрана от ударных воздействий загружаемой горной массы и внешних механических факторов; передних и задних брызговиков, ограничивающих попадание загрязнений и абразивных частиц, а также специализированного защитного кожуха (рис. 9а), обеспечивающего дополнительную изоляцию и механическое экранирование оборудования.

Монтаж криогенного топливного бака непосредственно на правом лонжероне рамы создает предпосылки для применения емкостей увеличенного объема, что невозможно при иных компоновочных схемах. Увеличение полезной вместимости криогенного бака приводит к уменьшению ко-

личества заправочных операций в пределах одной рабочей смены, что, в свою очередь, обеспечивает прирост производительности транспортного процесса. Для контроля параметров функционирования бака (уровня наполнения и рабочего давления в нем) в водительской кабине размещается уровнемер, получающий данные от емкостного датчика, интегрированного непосредственно в конструкцию криогенного топливного бака.

Эффективность предложенного способа подтверждена его практической реализацией в рамках проекта компании «ТехноЭко» (г. Прокопьевск, Россия), направленного на оснащение карьерных самосвалов криогенными бортовыми топливными системами.

В ходе выполнения проекта по описанному выше способу модернизации осуществлена установка крепежной платформы (с размещенным в ней криогенным топливным баком) на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306» (рис. 9а) и дизельномасляного бака на левом лонжероне рамы данного самосвала (рис. 9б).



а (а)



б (б)

Рис. 9. Модернизированный карьерный самосвал «БелАЗ-75306», оснащенный криогенной бортовой топливной системой: а – криогенный топливный бак, установленный на правом лонжероне рамы самосвала; б – дизельномасляный бак, установленный на левом лонжероне рамы самосвала /

Fig. 9. The modernized BelAZ-75306 mining truck equipped with a cryogenic onboard fuel system: а – cryogenic fuel tank installed on the right side member of the truck frame; б – diesel oil tank installed on the left side member of the truck frame

Заключение

Предлагаемый способ модернизации карьерного самосвала «БелАЗ-75306» для работы в газодизельном режиме обеспечивает достижение ряда существенных преимуществ, среди которых:

- снижение трудоемкости и упрощение технологических операций при установке криогенного топливного бака на правый лонжерон рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306»;
- повышение уровня эксплуатационной безопасности карьерных самосвалов серии «БелАЗ-75306» при функционировании в газодизельном режиме с использованием сжиженного природного газа (метана);
- возможность размещения бака увеличенного объема на правом лонжероне рамы машины, что расширяет запас криогенного топлива;
- рост производительности транспортных операций за счет уменьшения числа заправочных циклов в течение одной рабочей смены и снижения затрат на топливо;
- упрощение процедур заправки и технического обслуживания криогенного топливного резервуара, установленного на правом лонжероне рамы карьерного самосвала «БелАЗ-75306».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чегошев А.А., Нохрин С.А., Ельцов И.Е. Сжиженный природный газ, как альтернатива дизельному (нефтяному) топливу для карьерных самосвалов «БелАЗ». *Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции*. Новосибирск, 2021: 311-318.
Chegoshev A.A., Nokhrin S.A., Yeltsov I.E. Liquefied natural gas as an alternative to diesel (petroleum) fuel for BelAZ mining dump trucks. *Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk, 2021: 311-318. (In Russ.).
2. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В. Природный газ – перспективное моторное топливо карьерного автотранспорта для районов Севера. *Горная промышленность*. 2016; 6: 51-61.
Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Natural gas – a promising motor fuel for quarry vehicles in northern regions. *Mining Industry*. 2016; 6: 51-61. (In Russ.).
3. Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Анализ криогенных бортовых топливных систем, обеспечивающих двухтопливный (газодизельный) режим работы карьерных самосвалов. *Россия молодая: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года*. Кемерово, 2021: 103031-103036.
Yeltsov I.E., Nokhrin S.A. Analysis of cryogenic onboard fuel systems providing dual-fuel (gas-diesel) operation of mining dump trucks. *Young Russia: Collection of materials from the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Kemerovo, April 20–23, 2021*. Kemerovo, 2021: 103031–103036. (In Russ.).
4. Shingan B., Banerjee N., Kumawat M. [et al.]. Liquefied Natural Gas Value Chain: A Comprehensive Review and Analysis. *Chemical Engineering and Technology*. 2024; 47 (3): 430-447. <https://doi.org/10.1002/ceat.202300304>.
5. Bogomolov A.R., Dubov G.M., Azikhanov S.S. Comparative analysis of the concentration of CO₂, CO, CH₄, and O₂ in the exhaust gases of BelAZ dump trucks that use liquefied natural gas as a motor fuel. *Nexo Revista Científica*. 2022; 35 (2): 552-565. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14634>.
6. Нестеренко И.С., Нестеренко Г.А., Талызин В.С. О целесообразности перевода парка автомобилей на газодизельное топливо. *Автомобильная промышленность*. 2023; 2: 20-21.
Nesterenko I.S., Nesterenko G.A., Talyzin V.S. On the feasibility of converting the vehicle fleet to gas-diesel fuel. *Automotive Industry*. 2023; 2: 20-21. (In Russ.).
7. Хазин М.Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях Севера. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2019; 19 (1): 56-72. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.1.5>.
Khazin M.L. Converting quarry dump trucks to gas in northern conditions. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil, gas, and mining*. 2019; 19 (1): 56-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.1.5>.
8. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Фурзиков В.В. Факторы, предопределяющие выбор энергоносителя для силовых агрегатов горной и транспортной техники карьеров Якутии. *Горная промышленность*. 2017; 3: 56-59.
Tarasov P.I., Khazin M.L., Furzikov V.V. Factors determining the choice of energy source for power units of mining and transport equipment in the quarries of Yakutia. *Mining Industry*. 2017; 3: 56-59. (In Russ.).
9. Нестеренко И.С., Нестеренко Г.А., Талызин В.С. К вопросу применения газодизельной силовой установки в районах Крайнего Севера. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2023; 4 (38).
Nesterenko I.S., Nesterenko G.A., Talyzin V.S. On the use of gas-diesel power plants in the Far North. *Automobile. Road. Infrastructure*. 2023; 4 (38). (In Russ.).
10. Родионов В.Г. Перевод автотранспорта на газовое топливо – один из путей экологической политики государства. *Автотранспортное предприятие*. 2015; 12: 17-18.
Rodionov V.G. Converting motor vehicles to gas fuel is one of the ways to implement the state's environmental policy. *Motor Transport Enterprise*. 2015; 12: 17-18. (In Russ.).
11. Шарифуллин Э.И., Нурмиев А.А. Перевод тракторов и автомобилей на газовое топливо. *Агроинженерная наука XXI века: научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 100-летию Казанского ГАУ, Казань, 10–11 июня 2022 года*. Казань, 2022: 155-159.
Sharifullin E.I., Nurmiev A.A. Converting tractors and cars to gas fuel. *Agricultural Engineering Science of the 21st Century: Scientific Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of Kazan State Agrarian University, Kazan, June 10–11, 2022*. Kazan, 2022: 155-159. (In Russ.).
12. Pesonen Ja., Prinz R., Ovaskainen H., et al. Alternative Powertrains and Fuels in Heavy Non-Road Mobile Machinery and Their Future Expectations – A Review. *Current Forestry Reports*. 2025; 11 (1): 10. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00244-2>.
13. Макарова И.В., Ганиев М.М., Баринов А.С. и др. Современный автотранспорт горнопромышленного комплекса: проблемы и решения. *Горная промышленность*. 2025; S1: 28-33. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-28-33>.
Makarova I.V., Ganiev M.M., Barinov A.S., et al. Modern motor transport of the mining complex: challenges and solutions. *Russian Mining Industry*. 2025; (1S): 28-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-28-33>.
14. Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., et al. Temperature parameters in the combustion chambers of CUMMINS KTA-50 engines operating on various fuels under different fuel consumption rates. *E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, 2021: 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131503011>.
15. Патент № 2701133, Российская Федерация, МПК B60K 15/07, F17C 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале: № 2019103118; заявл. 04.02.19; опубл. 24.09.19, Бюл. № 27 / Нохрин С.А., Дубов Г.М., Трухманов Д.С.; заявитель ООО «Сибирь-Энерго». 14 с.: 7 ил.
Nohrin S.A., Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Patent 2701133 (The Russian Federation, 2019). (In Russ.).
16. Ельцов И.Е., Чегошев А.А., Нохрин С.А. Реконструкция палубы карьерного самосвала «БелАЗ-75131» для обеспечения его эксплуатации в газодизельном режиме. *Инновации в машиностроении: сборник трудов XII-й Международной научно-практической конференции* Новосибирск, 2021: 303-310.
Eltsov I.E., Chegoshev A.A., Nokhrin S.A. Reconstruction of the deck of the BelAZ 75131 dump truck to provide its gas-diesel operation. *Innovations in mechanical engineering: Proceedings of the XII International Scientific-Practical Conference*. Novosibirsk, 2021: 303-310. (In Russ.).

17. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck. *E3S Web of Conferences*. 2020; 174: 03016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403016>.
18. Сергель А.Н. Карьерные самосвалы «БелАЗ» на газовом топливе и СПГ. *Горная промышленность*. 2019. №5. С. 29-32
Sergel A.N. BelAZ gas-powered and LNG-powered mining dump trucks. *Mining Industry*. 2019; 5: 29-32. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Георгий Михайлович Дубов –

канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5383-8884>; e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

Александр Геннадьевич Кульпин –

ст. преподаватель кафедры эксплуатации автомобилей, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: kag.ea@mail.ru

Алексей Владимирович Черниченко –

аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: chernichenko98@mail.ru

Сергей Алексеевич Нохрин –

заместитель генерального директора, ООО «ТехноЭКО», 653046, г. Прокопьевск, Российская Федерация; e-mail: nsa500@mail.ru

Критерии авторства:

Г. М. Дубов – научный менеджмент, постановка исследовательской задачи, сбор и анализ данных; А. Г. Кульпин – концептуализация исследования, написание текста; А. В. Черниченко – обзор литературы, сбор и анализ данных; С. А. Нохрин – проведение исследований, обработка результатов, выводы. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.12.2025

Поступила после рецензирования: 16.12.2025

Принята к публикации: 21.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Georgy M. Dubov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5383-8884>; e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

Alexander G. Kulpin –

Senior Lecturer of the Department of Motor Vehicle Operation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: kag.ea@mail.ru

Alexey V. Chernichenko –

Post-graduate Student. T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: chernichenko98@mail.ru

Sergey A. Nokhrin –

in Engineering, Deputy General Director, TechnoEKO Limited Liability Company, 653046, Prokopyevsk, Russian Federation; e-mail: nsa500@mail.ru

Contribution:

G. M. Dubov – research management, data collection and analysis; A. G. Kulpin – conceptualisation of the study, setting the research problem, writing the text; A. V. Chernichenko – literature review, data collection and analysis; S. A. Nokhrin – research management, processing of results, conclusions. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 09.12.2025

Revised: 16.12.2025

Accepted: 21.12.2025

Модель выщелачивания металлосодержащего сырья с механохимической активацией

С. А. Масленников¹, С. Г. Страданченко², В. И. Голик^{3✉}

¹ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ФГБОУ ВО «ДГТУ»,
г. Шахты, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени Н. И. Платова»,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

³ Геофизический институт – филиал ФГБУН «Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр РАН», г. Владикавказ, Российская Федерация
✉ v.i.golik@mail.ru

Резюме. Новое направление в модернизации технологий разработки рудных месторождений связано с использованием дезинтеграторов-активаторов, которые являются инструментом защиты окружающей среды от воздействия отходов горной промышленности и увеличения базы строительной отрасли за счет перерабатываемых хвостов переработки руды. Актуальность нового направления инновационных технологий связана с использованием высокоскоростных дезинтеграторов-активаторов, принципиальное отличие которых заключается в том, что механическая активация хвостов обогащения сочетается с химическим извлечением из них металлов. Обоснована возможность управления процессами дробления руды, комбинированного извлечения металла и ускорения процессов выщелачивания. Создана новая универсальная математическая модель процессов извлечения металла при выщелачивании руды и переработке хвостов в различных режимах работы активатора. Показаны новые аспекты использования IT-технологий при извлечении металлов с механохимической активацией в горнодобывающей промышленности. Доказано, что полнота извлечения металла при разработке бедных руд и техногенных запасов может быть повышена за счет использования механохимических технологий с сочетанием физических и химических процессов переработки сырья в рамках горного производства. Представлены результаты экспериментальных исследований, обосновывающих преимущества и экономическую эффективность механохимического выщелачивания.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, подземная технология, активатор-дезинтегратор, отходы, руда, металлы, механохимическая активация

Для цитирования: Масленников С.А., Страданченко С.Г., Голик В.И. Модель выщелачивания металлосодержащего сырья с механохимической активацией. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):59-64. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-59-64>.

A model of leaching of metal-containing raw materials with mechanochemical activation

S. A. Maslennikov¹, S. G. Stradanchenko², V. I. Golik^{3✉}

¹ Institute of Service and Entrepreneurship, branch of DSTU, Shakhty, Russian Federation

² South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

³ Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Vladikavkaz, Russian Federation

✉ v.i.golik@mail.ru

Abstract. A new direction in the modernization of ore deposit development technologies is associated with the use of disintegrator activators, which is a tool for protecting the environment from the effects of mining waste and increasing the base of the construction industry due to recyclable ore processing tailings. The relevance of the new direction of innovative technologies is associated with the use of high-speed disintegrator activators, the fundamental difference of which is that the mechanical activation of enrichment tailings is combined with the chemical extraction of metals from them. The possibility of controlling the processes of ore crushing, combined metal extraction and acceleration of leaching processes is substantiated. A new universal mathematical model of metal extraction processes during ore

leaching and tailings processing in various modes of activator operation has been created. New aspects of the use of IT-technologies in the extraction of metals with mechanochemical activation in the mining industry are shown. It is proved that the completeness of metal extraction during the development of poor ores and man-made reserves can be increased by using mechanochemical technologies with a combination of physical and chemical processes for processing raw materials within the framework of mining. The results of experimental studies are presented to substantiate the advantages and economic efficiency of mechanochemical leaching.

Keywords: mining enterprise, underground technology, activator-disintegrator, waste, ore, metals, mechanochemical activation

For citation: Maslennikov S.A., Stradanchenko S.G., Golik V.I. A model of leaching of metal-containing raw materials with mechanochemical activation. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-59-64>.

Введение

Состояние современного горного производства характеризуется необходимостью извлекать металлы из бедных и забалансовых руд, техногенных запасов сырья и хвостов переработки руд [1–3].

Вопросам переработки руд в активаторах уделяется повышенное внимание, поскольку на кристаллы руды в растворе одновременно воздействуют силы, ускоряющие полноту и время выщелачивания [4–6]. Комбинирование процессов выщелачивания руды с активацией – эффективно, потому что вместе с дроблением руды в трещины кристаллов под действием инерционных сил нагнетается раствор реагентов. Экологическим компонентом проблемы является создание практически безотходной технологии извлечения металлов из бедных руд и хвостов переработки [7–9].

Пионерные технологии повышения качества продуктов горного производства средствами активации приведены в трудах российских и зарубежных исследователей [10–13]. Наиболее полно исследована эффективность блочного подземного выщелачивания сравнительно легко вскрываемого урана [14–16]. Результаты исследований указывают, что традиционные технологии не извлекают металлы до уровня санитарных норм и значительное количество металлов остается в хвостах переработки. Новизна подходов к технологиям переработки некондиционного сырья заключается в комплексном извлечении металлов в раствор реагентов.

Совершенствование технологий извлечения металлов осуществляется с использованием методов IT-технологий. Полнота извлечения металлов заключается в создании условий для дробления и перемешивания руды или хвостов переработки. Дробление происходит с выделением энергии, что повышает эффективность выщелачивания.

Значимость решаемой проблемы обуславливает необходимость развития дальнейших исследований затронутого направления горного дела [17–20].

Цель исследований: разработка нового подхода к обоснованию экономической эффективности и экологической безопасности выщелачивания металлов.

Методы исследования

Теория механического дробления руд в кислой среде, создание промышленных активаторов, лабораторные и натурные исследования, планирование, статистический, регрессионный и корреляционный анализ результатов экспериментов являются элементами научного обоснования актуальности проблемы [4–6].

Математическая модель дробления руд в дезинтеграторе строится на основе уравнения материального баланса с описанием механизма ударов по кристаллам руды. Модель движения вязких контрвихревых течений растворов в рабо-

чей зоне дезинтегратора создается на основании уравнений Навье – Стокса с распределением параметров движения раствора.

Параметры управления процессами механохимического выщелачивания описываются универсальной математической моделью процесса извлечения металлов при различных режимах работы дезинтегратора:

- описание механизма дробления и выщелачивания сырья, построение математических моделей движения растворов, изучение распределения скоростей и давлений при движении сырья и раствора в дезинтеграторе;
- формализация показателей управления процессами механохимического выщелачивания, экспериментальное обоснование преимуществ механохимического выщелачивания;
- детализация IT-технологий извлечения металлов с механохимической активацией и обоснование экономической эффективности новой технологии;
- применение классических моделей для описания процессов дробления рудных тел, движения вязких контрвихревых течений растворов, планирование экспериментов, использование статистических методов проверки значимости регрессионных зависимостей показателей выщелачивания.

Результаты исследования

Устройство для смешивания состоит из емкости и перемешивающих агрегатов, куда подаются руды и реагенты выщелачивания, которые смешиваются в общем потоке с плотностью ρ . Дезинтегрированные пески (рис. 1) выходят из активатора под действием силы тяжести.

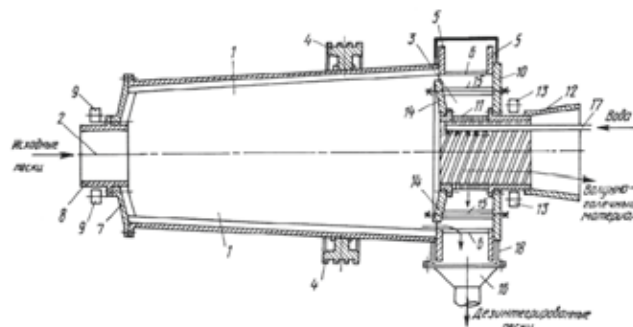


Рис. 1. Схема промышленного дезинтегратора: 1 – барабан; 2 – загрузочное устройство; 3 – разгрузочное устройство; 4 – шкив передачи; 5 – фланцы; 6 – окна для разгрузки; 7 – загрузочная крышка; 8 – загрузочный патрубок; 9 – ролики; 10 – крышка; 11 – цапфа; 12 – диффузор; 13 – ролики; 14 – отбойная плита; 15 – крепление; 16 – приемный лоток; 17 – опрыскивательная труба; 18 – кожух /

Fig. 1. Industrial disintegrator diagram: 1 – drum; 2 – loading device; 3 – unloading device; 4 – transmission pulley; 5 – flanges; 6 – unloading windows; 7 – loading cover; 8 – loading pipe; 9 – rollers; 10 – cover; 11 – journal; 12 – diffuser; 13 – rollers; 14 – baffle plate; 15 – fastening; 16 – receiving chute; 17 – sprinkler pipe; 18 – casing

Содержание фракций в дезинтеграторе равномерно распределено по объему, поэтому в нем происходит мгновенное перемешивание потоков, а параметры смеси резко изменяются.

Влажная руда содержит воду, сухую руду и реагенты:

$$F = Q + W + r \quad (1)$$

где F – производительность транспортировки влажной руды, т/ч;

Q – производительность транспортировки сухой руды, т/ч;

W – расход воды в сухой руде, т/ч;

r – расход реагентов, т/ч.

Объемы воды, реагентов и сухой руды описываются моделью

$$w = \frac{F - Q}{F} \cdot 100\% \quad (2)$$

где w – доля жидкой составляющей в растворе, %.

Решение уравнения материального баланса позволяет определить параметры раствора и его компонентов в характерных узлах процесса.

Уравнение движения вязкой жидкости в виде дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial u_r}{r \partial \theta} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} - \frac{u_\theta^2}{r} = \\ = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{P}{\rho} - \Pi \right) + \varepsilon \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - 2 \frac{\partial u_\theta}{r^2 \partial \theta} \right), \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + u_x \frac{\partial u_\theta}{\partial x} + u_r \frac{u_\theta}{r} = \\ = -\frac{\partial}{r \partial \theta} \left(\frac{P}{\rho} - \Pi \right) + \varepsilon \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + 2 \frac{\partial u_r}{r^2 \partial \theta} \right), \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial u_x}{r \partial \theta} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} - \Pi \right) + \varepsilon \nabla^2 u_x. \end{cases} \quad (3)$$

Решение указывает на затухающий характер движения потока по времени относительно начального значения вектора скорости $\vec{U}_0$, что означает снижение скоростей однородно-винтового потока по времени и преобразования энергии от составляющей скорости потока в тепловую энергию и энергию межмолекулярного взаимодействия.

Для установившегося режима работы дезинтегратора движение раствора в рабочей зоне установившемся:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = \frac{\partial u_\theta}{\partial t} = \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Система уравнений движения вязкой жидкости в линеаризованном виде

$$\begin{cases} \frac{u_\theta^2}{r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{P}{\rho V^2} \right), \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial x} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial (r u_\theta)}{r \partial r} \right], \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho V^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (5)$$

Средняя осевая скорость

$$V = Q / (\pi R^2), \quad (6)$$

где Q – расход потока жидкого раствора;

R – радиус поперечного сечения дезинтегратора;

$\text{Re} = VR/\varepsilon$ число Рейнольдса.

График зависимостей окружных скоростей $u_\theta(r, x)$ с числом Рейнольдса $\text{Re} = 500$ от безразмерной координаты r/R для различных значений продольной координаты $x = kR$, $k = 5, 10, 20, 40, 80, 160$ и с нормированной циркуляцией на входе в цилиндрический канал приведен на рисунке 2.

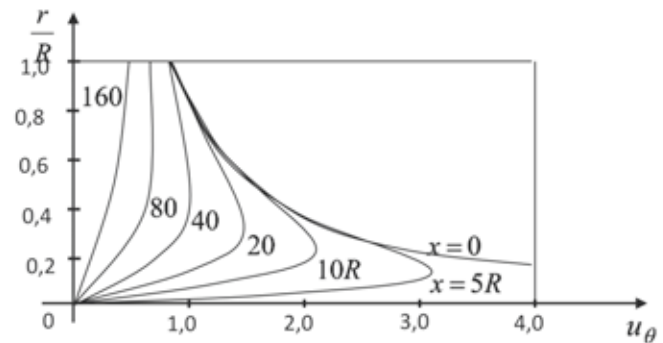


Рис. 2. Распределение окружных скоростей $u_\theta(r, x)$ /
Fig. 2. Distribution of peripheral speeds $u_\theta(r, x)$

Циркуляционное продольное течение, нормированное по средней скорости течения:

$$V = Q / (\pi R^2). \quad (7)$$

Распределение окружных скоростей $u_\theta(r, x; \text{Re})$ для значений числа Рейнольдса приведено на рисунке 3.

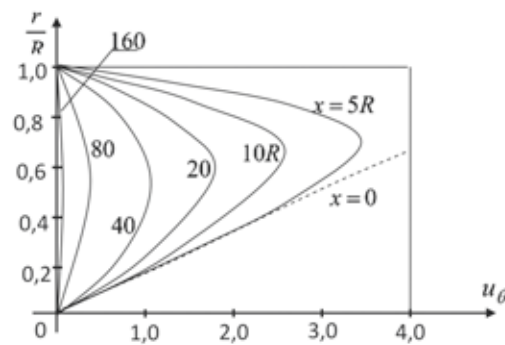


Рис. 3. Распределение окружных скоростей $u_\theta(r, x)$ /
Fig. 3. Distribution of peripheral speeds $u_\theta(r, x)$

Для циркуляционно-продольного потока характерно движение в форме вязкого вынужденного вихря, при этом изменение тангенциальных скоростей вдоль цилиндра дезинтегратора удовлетворяет распределению по экспоненте. При циркуляционно-продольном течении создающие профиль потока касательные напряжения убывают к нулю по продольной координате.

Использование процессов механохимической активации уменьшает энергетические затраты на выщелачивание и увеличивают эффективность технологии.

Динамика развития степени дробления руды характе-

ризуется тем, что показатели дробления руды с увеличением поверхности дробимого вещества возрастают, что подтверждается выщелачиванием хвостов в дезинтеграторе (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Извлечение металлов за 10 минут активации /
Extraction of metals in 10 minutes of activation**

Параметр процесса	Цинк 1	Цинк 2	Свинец 1	Свинец 2	Железо 1	Железо 2
Концентрация HCl в растворе	4–6	8–10	4–6	8–10	4–6	8–10
Извлечение без активации	8–17	26–30	12–29	42–48	15–17	23–28
Извлечение с активацией	32–47	58–71	31–43	49–52	24–44	55–64
Концентрация HCl в растворе	12–16	20	12–16	20	12–16	20
Извлечение без активации	36–39	42	52–56	60	31–33	37
Извлечение с активацией	75–85	89	64–66	70	70–75	79

Из таблицы 1 следует, что извлечение металлов в раствор при применении механохимической активации хвостов возрастает.

Параметры активизации процессов выщелачивания возрастают при условии комбинирования механической активации и теплового воздействия (рис. 4).

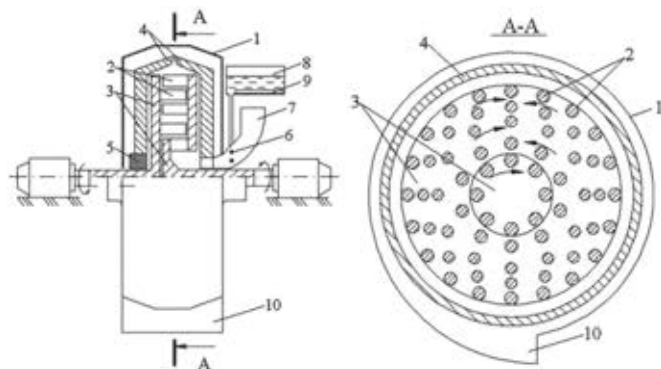


Рис. 4. Модернизация конструкции дезинтегратора /
Fig. 4. Modernization of the disintegrator design

Конструкция дезинтеграторной установки включает в себя корпус 1, ряды пальцев 2 на дисках 3-4, где один диск жестко соединен с валом электродвигателя, а второй закреплен в точке 5, форсунки 6, входной патрубок 7, емкость для жидкости 8, нагревательный элемент 9 и выпускную решетку 10.

Дробление хвостов в дезинтеграторе увеличивает однородность и прочность бетонной смеси. В эксперименте прочность исследовалась при следующих параметрах смеси: хвосты переработки – 1 445 кг/м³, цемент – 10 кг/м³, вода – 380 кг/м³; 40 % выхода – класса 0,076 мм (табл. 2).

Повторенная трижды механохимическая переработка хвостов дает прочность смеси порядка базовой при расходе цемента 100 кг/м³. Механоактивация хвостов повышает прочность смеси без связывающего цемента (табл. 3).

Таблица 2 / Table 2

**Зависимость прочности смесей от способа активации /
Dependence of the strength of mixtures on the activation method**

Компоненты смесей, кг/м ³				Прочность, МПа		
				Срок хранения кубов, сутки		
Цемент	Вяжущие	Инертные	Вода	14	28	90
Активация в шаровой мельнице						
40	400	1 200	350	0,30	0,42	0,61
80	360	1 200	350	0,44	0,62	0,73
120	320	1 200	350	0,82	1,03	1,25
180	260	1 200	350	1,09	1,24	1,57
Активация в дезинтеграторе						
40	400	1 200	350	0,62	0,94	1,19
80	370	1 200	350	0,92	1,22	1,44
120	320	1 200	350	1,22	1,41	1,67
180	260	1 200	350	1,62	1,71	2,13

Таблица 3 / Table 3

**Набор прочности смесей со временем /
Strength gain of mixtures over time**

Способ активации	Прочность смеси, МПа, возраст, сутки		
	7	14	28
Без активации с расходом портландцемента 100 кг/м ³	1,02	1,13	1,18
Механическая активация без реагентов	1,17	1,24	1,34
Агитационное выщелачивание без активации	0,53	0,62	0,74
Механическая активация с выщелачиванием в агитаторе	0,67	0,72	0,89
Механохимическая активация в дезинтеграторе	0,72	0,76	0,92
Троекратная механохимическая активация в дезинтеграторе	0,94	1,12	1,24

Эффективность передела хвостов повышается при комбинировании механоактивации и электроакустического воздействия акустических излучателей на внутренней поверхности рабочей камеры. Комбинирование улучшает показатели измельчения хвостов, что увеличивает прочность бетонных конструкций и расширяет возможности утилизации хвостов.

Эколого-экономическая эффективность переработки хвостов:

$$P_y > V_c + 3_n, \quad (8)$$

где P_y – прибыль от утилизации хвостов;

V_c – штрафы при нанесении ущерба природной среде;

3_n – затраты на утилизацию хвостов.

В результате дезинтеграторного дробления малая доля фракций имеет размеры более 125–400 мкм и менее 5 мкм, а основная часть фракций имеет размеры от 5 до 125 мкм. При помоле в шаровой мельнице высокодисперсные фракции обеспечивают существенное значение удельной поверхности ($S_{уд} = 4\,930 \text{ см}^2/\text{г}$) при относительно малой доле ее содержания (10,6 %).

Для обоснования перспектив активации процессов гидрометаллургического передела необходимо решить ряд задач: создания универсальной математической модели выщелачивания в дезинтеграторе; разработки программно-

го обеспечения процессов механохимической активации; создания методики нахождения эколого-экономического эффекта при механохимической активации процессов выщелачивания.

Выводы

1. Полнота извлечения металлов при разработке бедных руд и техногенных запасов увеличивается посредством применения механохимических технологий с сочетанием физических и химических процессов переработки.

2. Универсальная математическая модель процессов извлечения металлов при выщелачивании позволяет автоматизировать процесс извлечения металлов из бедных руд и техногенных запасов и повысить полноту использования недр.

3. Преимущества и экономическая эффективность выщелачивания с механохимической активацией обоснована теоретически и подтверждается практикой.

4. Резервом повышения параметров извлечения металлов с механохимической активацией является внедрение IT-технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И. и др. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. *Горный информационный аналитический бюллетень*. 2023; 12-1: 17-30. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.
- Valiev N.G., Propp V.D., Abramkin N.I., et al. The practice of leaching metals from substandard raw materials and ore dressing waste. *Mining Information Analytical Bulletin*. 2023; 12-1: 17-30. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.
- Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А. и др. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов. *Горный журнал*. 2017; 12: 46-51. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>.
- Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., et al. Improving the economic efficiency of mining enterprises by involving man-made georesources in the exploitation. *Mining Journal*. 2017; 12: 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>.
- Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., et al. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 69-74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>.
- Валиев Н.Г., Головырин С.С., Макаров В.В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных систем). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017; S23: 134-139.
- Valiev N.G., Golovyryn S.S., Makarov V.V. On the issue of using artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (problems of solving problems of modern mining production using multi-agent systems). *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; S23: 134-139. (In Russ.).
- Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х. и др. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. *Вектор Гео Науки*. 2019; 2 (1): 9-18.
- Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.H. Mineral resource base of non-ferrous metallurgy of Russia. *Vector of Geo Sciences*. 2019; 2 (1): 9-18. (In Russ.).
- Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development. V.I. Lakshmanan and all. (eds.). *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. Switzerland, 2016: 257-280. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0_18.
- Кожиев Х.Х., Босиков И.И. Комплексный показатель перспективности разработки участков месторождений полезных ископаемых. *Горный журнал*. 2017; 2: 101-107.
- Kojiev Kh. K., Bosikov I.I. A comprehensive indicator of the prospects for the development of mineral deposits. *Mining magazine*. 2017; 2: 101-107. (In Russ.).
- Аренс В.Ж., Гридин О.М., Дербунович Н.Н. и др. Опыт подземного выщелачивания желваковых фосфоритов. *Горный журнал*. 2016; 6: 56-63.
- Arens V.Zh., Gridin O.M., Derbunovich N.N., et al. Experience of underground leaching of nodular phosphorites. *Mining Journal*. 2016; 6: 56-63. (In Russ.).
- Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
- Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Бетров З.С. и др. Оценка природных и техногенных месторождений Республики Северная Осетия-Алания как возможных объектов применения технологий подземного и кучного выщелачивания. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2016; 8(1): 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51>.
- Khulelidze K.K., Kondratiev Yu.I., Betrov Z.S., et al. Assessment of natural and man-made deposits of the Republic of North Ossetia-Alania as possible objects of application of technologies of underground and heap leaching. *Sustainable development of mountainous territories*. 2016; 8(1): 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51>.
- Хайрутдинов А., Конгар-Сюрюн Ч., Ковалик Т. и др. Улучшение характеристик обратной засыпки путем активации отходов обогащения галита для безотходной геотехнологии. *Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия*. 2020; 867 (1): 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.
- Khairutdinov A., Kongar-Suryun Ch., Kovalik T., et al. Improving the characteristics of backfilling by activating halite enrichment waste for waste-free geotechnology. *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*. 2020; 867(1): 012018. (In Russ.). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.
- Minagawa M., Hisatomi S., Kato T. et al. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018; 29 (3): 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.11.031>.
- Kamariah N., Kalebic D., Xanthopoulos P., et al. Conventional versus microwave-assisted roasting of sulfidic tailings: mineralogical transformation and metal leaching behavior. *Minerals Engineering*. 2022; 183: 107587. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107587>.
- Морозов А.А., Смагин А.П., Безнос Г.Ф. и др. Технико-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля. *Горный журнал*. 2013; 8-2: 78-84.
- Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., et al. Technical and economic assessment of the effectiveness of block underground leaching of uranium from poor ores of the Streltsovsky ore field. *Mining Journal*. 2013; 8-2: 78-84. (In Russ.).

15. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Бурдонов А.Е. Активационное выщелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 1: 130-141. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130.
Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of persistent primary ores of the Malmyzhskoye deposit. *Mining information and analytical bulletin*. 2023; 1: 130-141. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130.
16. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б. и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3(49)): 406-415. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountainous territories*. 2021; 13 (3(49)): 406-415. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
17. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В. и др. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. *Горные науки и технологии*. 2021; 6(2): 73-89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>.
Ignatieva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., et al. Technogenic mineral formations: problems of transition to a circular economy. *Mining sciences and technologies*. 2021; 6(2): 73-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>.
18. Каплунов Д.Р., Юков В.А., Лавенков В.С. О влиянии годовой производительности на эффективность методов подземного выщелачивания медных руд. *ГИАБ*. 2017; 10: 5-11. Kaplunov D.R., Yukov V.A., Lavenkov V.S. On the effect of annual productivity on the effectiveness of methods of underground leaching of copper ores. *GIAB*. 2017; 10: 5-11. (In Russ.).
19. Chen G., Chen J., Peng J. Effect of mechanical activation on structural and microwave absorbing characteristics of high titanium slag. *Powder Technology*. 2015; 286: 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.021>.
20. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л. и др. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. *Горный журнал*. 2017; 11: 120-125.
Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., et al. Theory and practice of application of combined physico-chemical and energy effects on geo-materials and aqueous suspensions. *Mining magazine*. 2017; 11: 120-125. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Станислав Александрович Масленников –

канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, 346500, г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: mail@sssu.ru

Сергей Георгиевич Страданченко –

д-р техн. наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета, 346428, г. Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: ssg72@mail.ru

Владимир Иванович Голик –

д-р техн. наук, профессор, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 362002, г. Владикавказ, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@yail.ru

Сергей Алексеевич Нохрин –

заместитель генерального директора, ООО «ТехноЭКО», 653046, г. Прокопьевск, Российская Федерация; e-mail: nsa500@mail.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: 08.08.2025

Поступила после рецензирования: 10.12.2025

Принята к публикации: 18.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Stanislav A. Maslennikov –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction and Technosphere Safety at the Institute of Service and Entrepreneurship (branch) DSTU, 346500, Shakhty, Russian Federation; e-mail: mail@sssu.ru

Sergey G. Stradanchenko –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the South Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk, Russian Federation; e-mail: ssg72@mail.ru

Vladimir I. Golik –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 362002, Vladikavkaz, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@yail.ru

Sergey A. Nokhrin –

in Engineering, Deputy General Director, TechnoEKO Limited Liability Company, 653046, Prokopyevsk, Russian Federation; e-mail: nsa500@mail.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.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 08.08.2025

Revised: 10.12.2025

Accepted: 18.12.2025

Влияние волатильности цен на нефть на стратегию освоения трудноизвлекаемых запасов в России

В. С. Поплавский✉

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Акционерное общество «Сбондс.ру», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ senior.poplavskii@yandex.ru

Резюме. Анализируется влияние ценовой волатильности на стратегии геологоразведки и освоения трудноизвлекаемых запасов нефти в России (2005–2025 гг.). Установлено, что в периоды низких цен (2014–2016, 2020, 2022–2025 гг.) объемы разведочного бурения сократились на 38 %, фокус сместился в Восточную Сибирь и Арктику (включая проект «Восток Ойл»). Определено, что доля горизонтального бурения выросла с 11 до 95 %. Господдержка (налог на добавленную стоимость, льготы по налогу на добычу полезных ископаемых) и гибкие модели управления («незаконченные скважины») сохранили инвестиции при цене Urals 62 доллара за баррель к 2025 году. Показано: цифровые геологические модели снижают риски бурения на 20–30 %. Волатильность усугубляет технологическое отставание в гидроразрыве пласта и недофинансирование геологоразведки (95 % добычи – месторождения СССР), создавая угрозу дефицита запасов после 2035 года. Результаты исследований помогут в разработке стратегий ресурсного обеспечения, налоговой политики и импортозамещения.

Ключевые слова: волатильность нефтяных цен, трудноизвлекаемые запасы, геологоразведка, горизонтальное бурение, импортозамещение, налог на добавленную стоимость, Арктика, цифровые геологические модели, технологическое отставание, государственная поддержка

Для цитирования: Поплавский В.С. Влияние волатильности цен на нефть на стратегию освоения трудноизвлекаемых запасов в России. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):65–71. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-65-71>.

The impact of oil price volatility on the development of hard-to-recover reserves in Russia

V. S. Poplavsky✉

Saint Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russian Federation

Cbonds.ru JSC, St. Petersburg, Russian Federation

✉ senior.poplavskii@yandex.ru

Abstract. The article examines the impact of oil price volatility on geological exploration strategies and the development of hard-to-recover oil reserves in Russia (2005–2025). During low-price periods (2014–2016, 2020, 2022–2025), exploration drilling volumes declined by 38 %, with activity shifting to Eastern Siberia and the Arctic (including the Vostok Oil project). The share of horizontal drilling rose from 11 % to 95 %. State support measures—such as the Additional Income Tax (AIT) and Mineral Extraction Tax (MET) benefits—along with flexible management models (“unfinished wells”) sustained investment levels despite an average Urals crude price of \$62/barrel by 2025. Digital geological models reduced drilling risks by 20–30 %. Price volatility exacerbates technological lag in hydraulic fracturing and chronic underfunding of exploration (95 % of current production stems from Soviet-era fields), creating a threat of reserve deficits after 2035. The findings can inform resource security strategies, tax policy adjustments, and technology import substitution initiatives for oil companies and policymakers.

Keywords: oil price volatility, hard-to-recover reserves, geological exploration, horizontal drilling, import substitution, additional income tax, Arctic, digital geological models, technological lag, state support

For citation: Poplavsky V.S. The impact of oil price volatility on the development of hard-to-recover reserves in Russia. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):65–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-65-71>.

Введение

В условиях глобальной энергетической трансформации и геополитической нестабильности российская нефтегазовая отрасль сталкивается с беспрецедентным сочетанием вызовов: ценовой волатильностью, санкционным давлением, истощением традиционных запасов и необходимостью освоения трудноизвлекаемых ресурсов.

За последние 20 лет отрасль неоднократно демонстрировала способность адаптироваться к шокам, однако каждый кризис оставлял после себя структурные изменения в стратегии геологоразведки и разработки месторождений. Волатильность мировых цен на нефть является одним из ключевых факторов, определяющих стратегические решения российских нефтегазовых компаний. Анализ двух последних десятилетий показывает, что отрасль демонстрирует значительную устойчивость к ценовым шокам, однако каждый кризис приводил к существенным структурным изменениям в подходах к разведке и добыче. Наиболее яркие примеры таких изменений наблюдались в периоды падения цен в 2014–2016 годах и в 2020-м.

Цель исследования: выявить закономерности адаптации российской нефтегазовой отрасли к ценовым шокам и оценить устойчивость текущей модели освоения трудноизвлекаемых запасов в долгосрочной перспективе с учетом эмпирических данных по добыче и ценам за 2005–2025 года.

Методы исследований

В работе использованы методы системного анализа, сравнительного анализа инвестиционной и буровой активности, а также качественный анализ кейсов крупнейших нефтедобывающих компаний («Роснефть», «Лукойл», «Газпром нефть»).

Источниками данных послужили официальные отчеты компаний, аналитические обзоры RPI Consulting, Kept, CyberLeninka, а также международные базы (Science Direct, Research Gate) и данные Cbonds.ru. Особое внимание уделено динамике объемов разведочного и эксплуатационного бурения, географии освоения и технологическим решениям в условиях ценовых шоков.

Дополнительно проанализированы временные ряды добычи нефти в России (2005–2025 гг.), цены на нефть Urals и нефтяную корзину ОПЕК для выявления корреляций и средних значений в кризисные периоды.

Результаты исследований

Анализ результатов исследований показал, что в периоды падения цен на нефть (2014–2016 и 2020 гг.) наблюдалась устойчивая тенденция к сокращению разведочного бурения: с 75 км/мес. в 2022 году до 46 км/мес. в начале 2025 г.¹ Одновременно повышалась доля горизонтального бурения с 11 % в 2010 году до прогнозируемых 95 % к концу 2030-го [1, 2].

География освоения смещается от Западной Сибири к Восточной Сибири и Арктике: в 2020 году «Роснефть» запустила проект «Восток Ойл» на Таймыре несмотря на кризис².

¹ Российский рынок бурения нефтяных скважин: текущее состояние и сценарии развития до 2032 года [Электронный ресурс]. RPI Consulting. 2025. URL: <https://rpi-consult.ru/reports/dobycha-nefti-i-gaza/rossiyskiy-rynok-burenija-2025/> (дата обращения: 26.11.2025).

² Чем запомнился отрасли 2020 г.: глазами Neftegaz.RU [Электронный ресурс] // Нефтегаз.РУ. 2020. 31 декабря. URL: <https://neftegaz.ru/news/newsneftegaz/657731-chem-zapomnilsya-otrasli-2020-g-glazami-neftegaz-ru/> (дата обращения: 09.10.2025)

Внедрены инновационные практики, такие как строительство «незаконченных скважин», позволяющих быстро реагировать на рост цен³. Государственная поддержка через налог на добавленную стоимость (НДД) и льготы по НДС компенсирует высокие издержки на трудноизвлекаемые запасы⁴.

Согласно международным оценкам, пандемия COVID-19 и ценовая война Россия – Саудовская Аравия усилили волатильность, приведя к временному снижению добычи нетрадиционной нефти на 15–20 % в глобальном масштабе и с аналогичными эффектами в России.

Количественный анализ динамики добычи и цен

На основе данных по добыче нефти в России, согласно Cbonds.ru (ежемесячно, 2005–2025 гг.), выявлено, что средняя добыча за период составила 9 848 тыс. т, с минимумом 8 592 тыс. т (2016 г.) и максимумом 10 832 тыс. т (2021 г.)⁵. В период кризиса 2014–2016 годов средняя добыча снизилась до 10 304 тыс. т (на 5 % по сравнению с предкризисным уровнем), а в 2020 году – до 9 427 тыс. т (падение – на 8,4 % к 2019 г.), что соответствует сокращению на 2,5 млн баррель в сутки в рамках ОПЕК+ [3]. Несмотря на санкции, к 2025 году добыча восстановилась до среднего уровня 9 808 тыс. т благодаря фокусу на трудноизвлекаемые запасы (ТриЗ) в Восточной Сибири.

Цены на Urals в 2025 году составили в среднем 62 доллара за баррель (диапазон – 59–66 долларов)⁶, что на 10 % ниже среднего по ОПЕК (70 долларов), подчеркивая дисконт из-за геополитики. Корреляция между добычей и ценами Urals – слабая ($r \approx 0,2$ за доступный период), что указывает на буферные механизмы (госсубсидии, импортозамещение).

Реакция российской нефтегазовой отрасли на ценовые шоки 2014–2016 годов и 2020 года

Период 2014–2016 годов стал для российской нефтегазовой отрасли временем серьезных испытаний. Падение мировых цен на нефть с уровня около 110 долларов за баррель до диапазона 45–55 долларов и обесценивание рубля оказали мощное макроэкономическое давление [4]. Экономическая зависимость от цен на нефть проявилась через курс валюты: анализ временных рядов показал наличие значимого влияния курса рубля к доллару США на инфляцию в России. Это в свою очередь напрямую затронуло операционные расходы компаний. Себестоимость добычи нефти выросла с 7 420,5 рубля за тонну в I квартале 2013 года до 13 406,4 рубля в II квартале 2018 года [5]. Однако при цене на нефть ниже 50 долларов за баррель (как это было в первом кластере исследуемого периода) макроэкономическое давление возрастало, что вынуждало компании пересматривать инвестиционные программы.

³ Российский рынок бурения нефтяных скважин: текущее состояние и сценарии развития до 2030 года [Электронный ресурс] // RPI Consulting. 2021. Апрель. URL: <https://rpi-consult.ru/reports/dobycha-nefti-i-gaza/burenie+21/> (дата обращения: 09.10.2025)

⁴ Налог на дополнительный доход от добычи углеводородного сырья: федеральный закон от 19.07.2018 № 199-ФЗ (ред. от 28.12.2022) // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302592/ (дата обращения: 26.11.2025)

⁵ Добыча нефти в России [Электронный ресурс] // Cbonds.ru. URL: <https://cbonds.ru/indexes/51285/> (дата обращения: 09.10.2025).

⁶ Нефть Urals | 2012–2025. Данные [Электронный ресурс] // Cbonds.ru. URL: <https://cbonds.ru/indexes/urals-crude-oil/> (дата обращения: 09.10.2025)

На операционном уровне это выражалось в сокращении объемов бурения. Общий объем проходки в 2014 году сократился на 4,1 % по сравнению с 2013 годом.⁷ Инвестиции в нефтедобычу за 2014–2016 года снизились на 45 % [6]. В ответ на падение спроса и цен в рамках соглашения ОПЕК+ Россия сократила добычу на 2,5 млн баррелей в сутки с мая 2020 года. Компании были вынуждены применять жесткие меры по сокращению капитальных затрат. Например, средняя капиталоемкость добычных проектов в России за 2014–2016 года снизилась на 30 %. Крупнейшие независимые нефтегазовые компании сократили расходы на 20–25 % уже в 2015 году по сравнению с 2014-м. Такие игроки, как Occidental Petroleum, сократили дивиденды на 86 % и снизили капитальные затраты с 5,3 до 3,6 млрд долларов. Акции компаний, таких как Apache, упали с 60 долларов в январе 2015 года до менее чем 8 долларов.

Несмотря на общее сокращение активности, именно этот период стал катализатором технологической модернизации. Увеличение стоимости бурения, которое растет с лагом в 6 кварталов после роста цен, заставило компании искать пути повышения эффективности [1, 7]. Быстрый рост доли горизонтального бурения стал одной из главных реакций на кризис. Если в 2010 году доля горизонтальных скважин в эксплуатационном бурении составляла 11 %, то к 2017 году она достигла 41 % [2, 8]. Этот переход был продиктован необходимостью извлекать больше нефти из каждой новой скважины для компенсации снижения общего объема работ. Параллельно усилилась работа по импортозамещению, которая ранее была признана приоритетной. Санкции, введенные США в 2014 году, ограничивали доступ к технологиям гидроразрыва пласта (ГРП) для разработки сланцевых отложений, что стало дополнительным стимулом для развития отечественных решений.

Ситуация в 2020 году повторила многие черты предыдущих кризисов, но с уникальными особенностями. Цены на нефть достигли отрицательных значений к 20 апреля 2020 года на фоне пандемии COVID-19 и ценового противостояния между Россией и Саудовской Аравией [3]. Добыча нефти в России сократилась на 8,4 % в 2020 году по сравнению с 2019 годом, достигнув 514 млн тонн [3]. Все крупные российские нефтяные компании сократили объемы производства. Однако в отличие от 2014–2016 годов, когда сокращение бурения было массовым, в 2020 году некоторые компании продолжили реализацию долгосрочных проектов.

Например, «Роснефть» начала эксплуатационное бурение в мае 2020 года в рамках проекта «Восток Ойл» на Таймыре, включая Ванкорский кластер. Это свидетельствует о более зрелой и стратегически ориентированной модели принятия решений. Кроме того, в условиях беспрецедентного падения цен была предложена инновационная концепция строительства незаконченных скважин («пеньков»), которые можно быстро завершить при росте цен, сокращая срок вывода в эксплуатацию с нескольких лет до нескольких месяцев. Эта идея стала прямым следствием необходимости минимизи-

ровать издержки и сохранить гибкость в условиях высокой неопределенности.

Таким образом, оба кризиса продемонстрировали способность российской отрасли адаптироваться, но с разными акцентами: 2014–2016 года стали периодом жесткой экономии и технологического скачка, а 2020 год – периодом внедрения инновационных моделей управления рисками.

Изменение портрета геологоразведочных работ и освоения месторождений

Ценовая волатильность напрямую трансформирует портрет геологоразведочных работ (ГРП) и выбор месторождений для освоения в России. При падении цен на нефть стратегия меняется с фундамента: компаниям приходится переходить от поиска новых, потенциально больших, но и более сложных и дорогих залежей к фокусировке на поддержании текущей добычи на уже известных и более простых объектах. Этот процесс очевиден на примере динамики объемов и направлений работ.

Одним из наиболее ярких индикаторов этой трансформации является динамика геологоразведочного (разведочного) бурения. После падения цен в 2014 году наблюдался резкий скачок этого вида работ. В 2013 году объем проходки в разведочном бурении составлял около 750 тыс. м, но в 2014-м он начал расти, а в 2015-м вновь сократился. В 2016 году разведочное бурение снова выросло на 6,1 % и достигло 910 тыс. м. Этот рост объяснялся не поиском новых территорий, а необходимостью детально изучить участки внутри лицензионных площадей, чтобы найти наиболее рентабельные зоны для дальнейшей разработки методом горизонтального бурения.

Этот тренд сохранился и в более поздний период: в январе-феврале 2025 года среднемесячный объем разведочного бурения составил 46 км, что значительно ниже показателей довоенного времени (75 км в аналогичный период 2022 г.). Снижение активности в разведке свидетельствует о том, что финансирование теперь направлено в первую очередь на эксплуатационное бурение, а не на открытие новых залежей. По оценкам, Россия добывает около 95 % нефти и конденсата на месторождениях, открытых еще в советское время⁸.

Выбор географии освоения также кардинально меняется. При высоких ценах компании могут позволить себе работать на самых сложных и дорогих площадках, таких как Арктика или глубоководный шельф. Однако при низких ценах деятельность смещается в регионы с лучшими экономическими условиями и более развитой инфраструктурой. В 2016 году, например, активность в бурении наблюдалась в новых регионах, таких как Восточная Сибирь (Юрубчено-Тохомская зона) и Тимано-Печорский регион. Эти регионы, несмотря на географическую удаленность и суровые климатические условия, предлагали более привлекательные экономические параметры по сравнению с такими проектами, как Арктика. Рентабельность добычи на арктическом шельфе возможна только при ценах на нефть 100–120 долларов за баррель, что делает проекты нерентабельными при низких ценах [5]. Это объясняет, почему такие гигантские проекты, как «Шток-

⁷ Российский рынок бурения нефтяных скважин: текущее состояние и сценарии развития до 2032 года [Электронный ресурс] // RPI Consulting. 2025. Апрель. URL: <https://rpi-consult.ru/reports/dobycha-nefti-i-gaza/rossiyskiy-rynok-bureniya-2025/> (дата обращения: 26.11.2025).

⁸ Россия наращивает объемы бурения нефтяных скважин. Ждём проблем? [Электронный ресурс] // Нефтегаз.РУ. 2024. 10 января. URL: <https://neftegaz.ru/news/drill/811026-rossiya-narashchivaet-obemy-bureniya-neftnyanykh-skvazhin-zhdem-problem/> (дата обращения: 26.11.2025).

мановское», «Ленинградское» и «Русановское», остаются в долгосрочной перспективе.

Даже в рамках одного региона наблюдается смещение фокуса. В Западной Сибири, где сосредоточено около 90 % объема эксплуатационного бурения⁹, компании фокусируются на освоении наиболее продуктивных пластов, используя передовые технологии. Например, в ХМАО в 2023 году добыча снизилась на 3,2 %, что указывает на истощение основных залежей и необходимость интенсификации работ на старых площадях. В то же время при наличии высоких цен и государственной поддержки, новые регионы становятся центрами роста. Проект «Восток Ойл» на Таймыре, запущенный «Роснефтью», является ярким примером такого стратегического шага, сделанного даже в условиях кризиса 2020 года. Открытие крупных газовых месторождений в Арктике в 2020 году, таких как Маршала Жукова и Маршала Рокоссовского, также говорит о продолжающихся исследованиях в этом регионе, хотя их коммерческое освоение будет зависеть от будущих цен.

Таким образом, география деятельности постоянно адаптируется: от широкого поиска в периоды роста цен к целенаправленному освоению наиболее перспективных и рентабельных участков в периоды спада.

Технологический выбор и роль маркшейдерской службы в адаптации к рыночной нестабильности

В условиях волатильности цен на нефть технологический выбор становится не просто вопросом технической эффективности, а ключевым элементом стратегии выживания и рентабельности. Российская нефтегазовая отрасль, столкнувшись с ценовыми шоками и санкционным давлением, была вынуждена провести масштабную технологическую адаптацию, сфокусировавшись на повышении производительности и снижении издержек [9]

Центральным технологическим трендом, усилившимся в периоды низких цен, стал переход на горизонтальное бурение. Этот метод позволяет значительно увеличить площадь контакта с продуктивным пластом, тем самым повысить дебит скважины и общую эффективность разработки. В период с 2010 по 2017 год доля горизонтальных скважин в общем объеме эксплуатационного бурения в России выросла с 11 до 41 %. Этот рост был неслучайным: вызван необходимостью получать максимальный эффект от каждого доллара, вложенного в бурение. В 2016 году доля горизонтального бурения составляла 33,5 %, а к 2020-му достигла 50 %. Прогнозируется, что к концу 2020-х годов эта доля достигнет 95 %¹⁰. Эта тенденция подтверждает, что при ограниченном бюджете на бурение компании выбирают наиболее эффективный способ максимизации добычи. В Западной Сибири, где сосредоточено подавляющее большинство скважин, доля горизонтальных скважин уже составляет около 80 %.

⁹ Нефтегазовая отрасль в 2023–2024 гг. Анализ изменения состояния на примере крупнейших в мире публичных нефтегазовых компаний [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. 2025. № 4. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/885325-neftegazovaya-otrasl-v-2023-2024-gg-analiz-izmeneniya-sostoyaniya-na-primerekрупнейshikh-v-mire-pub/> (дата обращения: 26.11.2025).

¹⁰ Россия наращивает объёмы бурения нефтяных скважин. Ждём проблем? [Электронный ресурс] // Нефтегаз.РУ. 2024. 10 января. URL: <https://neftegaz.ru/news/drill/811026-rossiya-narashchivaet-obemy-bureniya-neftyanykh-skvazhin-zhdem-problem/> (дата обращения: 26.11.2025).

Санкционное давление, начавшееся в 2014 году, стало мощным катализатором для локализации технологий и импортозамещения [5, 6]. Запреты на поставку американских технологий для разработки бажендовской свиты и последующие ограничения со стороны ЕС и США заставили компании искать отечественные аналоги. Это привело к замене импортных систем на российские аналоги, например, роторных управляемых систем на телесистемы и винтовые забойные двигатели, а также использованию отечественных РДС-долот. Хотя эксперты отмечают, что полный отказ от импортных компонентов может привести к снижению эффективности (например, сокращению количества стадий ГРП и длины горизонтальных стволов), сам факт такой переориентации демонстрирует способность отрасли к быстрой адаптации. Министерство промышленности и торговли определило приоритеты импортозамещения, включая ГРП, наклонно-направленное бурение и шельфовые технологии. Ключевыми поставщиками оборудования стали российские заводы, такие как УРБО (филиал ООО «Уралмаш НГО Холдинг») и Трубная металлургическая компания.

Роль маркшейдерской и геологической службы в этом процессе стала еще более критичной. Их задача заключается не только в точном позиционировании скважин, но и в обеспечении максимальной эффективности бурения в рамках заданных бюджетов. Переход на горизонтальное бурение требует высочайшей точности позиционирования для гарантированного попадания в тонкий продуктивный пласт. Любая неточность здесь приводит к значительным потерям добычи и рентабельности. Поэтому технологии, такие как ГТИ с системой «умного бурения» и дистанционным управлением, внедренные компанией «Газпром бурение», позволяют получать дополнительные объемы добычи и повышать эффективность работы. Эти системы позволяют в реальном времени корректировать траекторию скважины, минимизируя риски и максимизируя контакт с пластом.

Аналитические данные подтверждают важность этих служб. Исследования показывают наличие значимых временных лагов в реакции буровой активности на цены на нефть, причем реакция более быстрая при снижении активности [1, 7]. Это означает, что решения, принимаемые сегодня, основаны на прогнозах, а не на текущей цене. Именно маркшейдеры и геологи обеспечивают эту точность и прогнозируемость. Они используют современные методы интерпретации сейсморазведочных данных, геофизических исследований скважин и геостатистического моделирования для создания детальных трехмерных моделей залежей. Это позволяет не только выбрать оптимальное расположение скважин, но и спрогнозировать их производительность, что крайне важно при ограниченных инвестиционных ресурсах.

Таким образом, в периоды нестабильности роль этих служб смещается от чисто технической к стратегической: они становятся ключевыми аналитиками, помогающими компании принимать решения о том, какие участки залежей являются наиболее рентабельными для освоения в конкретных рыночных условиях.

Экономическая целесообразность и геотехнологические решения в контексте санкций

Экономическая целесообразность и геотехнологические решения в российской нефтегазовой отрасли находятся в сложной взаимосвязи, где внешние факторы, в первую оче-

редь санкции, играют роль доминирующего катализатора. Стремление к максимальной рентабельности, усиленное необходимостью преодолевать технологическое эмбарго, привело к формированию уникальной модели освоения трудноизвлекаемых запасов, основанной на сочетании технологической адаптации и государственной поддержки.

Основополагающим фактором, определяющим экономику любой добычи, является себестоимость. Для российских компаний она остается относительно невысокой. Себестоимость добычи в России оценивается в 3–5 долларов за баррель без учета транспортировки и налогов, а с учетом всех затрат для месторождений Западной Сибири – до 15–20 долларов за баррель [5]. Отмечается, что российские нефтедобытчики могут работать при ценах на нефть 60–70 долларов за баррель, поскольку их критический уровень рентабельности находится на отметке 30–40 долларов за баррель [8]. Это делает их значительно более устойчивыми к ценовым шокам по сравнению, например, с американскими производителями сланцевой нефти, где точка безубыточности находится на уровне 69 долларов за баррель. Однако это преимущество частично нивелируется санкциями, которые заставляют нести дополнительные издержки на импортозамещение и логистику [10].

Санкции стали главным стимулом для технологической адаптации. Ограничения на доступ к передовым зарубежным технологиям, особенно в области многостадийного гидроразрыва пласта для разработки сланцевых отложений типа баженовской свиты, вынудили отрасль создавать собственные решения. Вице-премьер Дмитрий Новак отметил снижение импортозависимости отрасли с 67 до 38 % за последние годы¹¹. Компании активно развивают собственные технологии для освоения ТРИЗ, включая многостадийный ГРП, который может включать более 60 стадий. Эта локализация является стратегической инвестицией, целью которой является достижение самообеспечения и снижение зависимости от внешних поставщиков.

Государство играет ключевую роль в поддержании экономической целесообразности освоения ТРИЗ и Арктики. Эти регионы характеризуются высокими затратами и сложными условиями, что делает их освоение нерентабельным без специальных мер. Введение налогового режима НДД и льгот по налогу на добычу полезных ископаемых с 2015 года было направлено на стимулирование добычи на низкорентабельных месторождениях. Эти механизмы частично компенсируют высокие издержки и позволяют проектам быть экономически жизнеспособными при более низких ценах. Без такой поддержки, по мнению экспертов, освоение ТРИЗ и Арктики стало бы нерентабельным¹².

Таким образом, экономическая модель освоения ТРИЗ в России представляет собой трехстороннее взаимодействие:

1. Низкая базовая себестоимость, которая обеспечивает конкурентное преимущество на рынке.
2. Высокие затраты на ТРИЗ и Арктику через необходи-

мость применения сложных технологий и работы в суровых условиях.

3. Государственная поддержка через фискальные стимулы (НДД, льготы по НДС), которые компенсируют часть издержек и делают проекты рентабельными. Эта модель позволяет отрасли продолжать работать над освоением сложных залежей даже при ценовой волатильности.

Однако она также создает риски.

Во-первых, зависимость от импортозамещения может приводить к потере эффективности и снижению продуктивности скважин.

Во-вторых, полная переориентация на внутренние рынки и технологии ограничивает доступ к мировым инновациям и может замедлить долгосрочный технологический прогресс.

В-третьих, полный отказ от геологоразведки в пользу интенсификации старых месторождений создает риск дефицита запасов в будущем, когда потребуются их замена, что может произойти примерно с 2035 года.

Таким образом, экономическая целесообразность и геотехнологические решения формируют сложную картину, где краткосрочные стратегии адаптации должны гармонизироваться с долгосрочными интересами отрасли.

Обсуждение результатов

1. Полученные результаты подтверждают гипотезу о формировании новой модели устойчивости, основанной на трех китах: низкой базовой себестоимости, технологическом суверенитете и фискальной поддержке. Однако выявлены серьезные риски. Хроническое недофинансирование геологоразведки создает угрозу дефицита запасов после 2035 года. Санкции ускоряют импортозамещение, но могут снижать эффективность: отечественные аналоги ГРП пока уступают зарубежным по числу стадий и длине стволов [8].

2. Роль геологических служб возрастает, они становятся центрами аналитики, обеспечивающими точность попадания в пласт. Эмпирические данные подтверждают: падение добычи в 2020 году на 8,4 % коррелирует с ценами ниже 50 долларов, но восстановление к 2025 году (до 9 808 тыс. т) иллюстрирует эффективность адаптации через горизонтальное бурение и госльготы. В условиях низких цен Urals (\$62 в 2025 г.) фокус на ТРИЗ в Арктике (рентабельность при >\$100) требует осторожности, но проекты вроде «Восток Ойл» демонстрируют стратегическую устойчивость.

3. Технологический выбор и роль маркшейдерской службы в адаптации к рыночной нестабильности. В условиях волатильности цен на нефть технологический выбор становится не просто вопросом технической эффективности, а ключевым элементом стратегии выживания и рентабельности. Российская нефтегазовая отрасль, столкнувшись с ценовыми шоками и санкционным давлением, была вынуждена провести масштабную технологическую адаптацию, сфокусировавшись на повышении производительности и снижении издержек.

4. Центральным технологическим трендом, усилившимся в периоды низких цен, стал переход на горизонтальное бурение. Этот метод позволяет значительно увеличить площадь контакта с продуктивным пластом, тем самым повысить дебит скважины и общую эффективность разработки. В период с 2010 по 2017 год доля горизонтальных скважин в общем объеме эксплуатационного бурения в России выросла с 11 до 41 %. Этот рост был неслучайным: вызван необходимостью

¹¹ Россия наращивает темпы бурения нефтяных скважин быстрее, чем за последние 5 лет [Электронный ресурс] // Себряковский механический завод. 2025. 15 июля. URL: <https://sebyakovovo.ru/news/145/> (дата обращения: 26.11.2025).

¹² Инвестиционная активность в добыче нефти и газа [Электронный ресурс] // PRCS. URL: <https://prcs.ru/reviews/investicionnayaaktivnost-v-dobyche-nefti-i-gaza/> (дата обращения: 09.10.2025).

получать максимальный эффект от каждого доллара, вложенного в бурение. В 2016 году доля горизонтального бурения составляла 33,5 %, а к 2020-му достигла 50 %. Прогнозируется, что к концу 2020-х годов эта доля достигнет 95 %. Эта тенденция подтверждает, что при ограниченном бюджете на бурение компании выбирают наиболее эффективный способ максимизации добычи. В Западной Сибири, где сосредоточено 90 % бурения, этот тренд усиливает интенсификацию старых месторождений.

Ограничения исследования

Анализ ограничен доступными публичными данными, что может не отражать конфиденциальную информацию компаний. Модели GARCH предполагают стационарность, но геополитические шоки вводят нелинейности, требующие дополнительных эмпирических тестов. Данные по ценам 2025 года – частичны, что ограничивает корреляционный анализ.

Предложения по направлению будущих исследований

Рекомендуется разработка интегрированных моделей, учитывающих климатические риски и переход к зеленой энергии, с фокусом на симуляцию сценариев для Арктики. Дополнительно – эмпирический анализ влияния НДД на рентабельность ТРИЗ при волатильности >30 %.

Заключение

1. Российская нефтегазовая отрасль успешно адаптировалась к волатильности через технологическую модернизацию, гибкое управление проектами и активное использование государственных инструментов поддержки.

2. Однако устойчивость этой модели в долгосрочной перспективе зависит от возобновления геологоразведочных работ, дальнейшего развития отечественных технологий и баланса между краткосрочной рентабельностью и стратеги-

ческой обеспеченностью запасами. Без этих мер к 2035 году страна может столкнуться с системным дефицитом добычи, что потребует радикальной перестройки энергетической стратегии.

3. Данные 2025 года подтверждают частичное восстановление, но подчеркивают необходимость инвестиций в разведку для минимизации рисков.

Выводы

1. В статье на основе анализа динамики добычи, бурения и инвестиций за 2005–2025 годы доказано, что российская нефтегазовая отрасль сформировала устойчивую модель адаптации к ценовой волатильности, сочетающую резкое сокращение геологоразведки в периоды низких цен, массовый переход на горизонтальное бурение, смещение активности в новые регионы (Восточная Сибирь, Арктика), ускоренное импортозамещение технологий и использование гибких инструментов управления проектами при активной государственной фискальной поддержке.

2. Вместе с тем выявлены системные риски текущей модели: хроническое недофинансирование поиска новых запасов (95 % добычи по-прежнему обеспечивается месторождениями советского периода) и сохраняющееся технологическое отставание в многостадийном ГРП, что уже в среднесрочной перспективе (после 2035 г.) может привести к дефициту воспроизводства ресурсной базы при сохранении сегодняшних приоритетов финансирования.

3. Результаты исследований могут быть полезными при разработке долгосрочной стратегии ресурсного обеспечения страны, корректировке налогового режима, планировании импортозамещения технологий и определении приоритетных направлений финансирования геологоразведки для нефтяных компаний, профильных министерств и органов государственной власти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ringlund G.B., Rosendahl K.E., Skjerpen T. Does oilrig activity react to oil price changes? An empirical investigation. *Energy Economics*. 2008; 30 (2): 371-396. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.06.002>.
2. Osmundsen P., Roll K.H., Tvetrås R. Drilling decisions and oil prices: The role of experience *Energy Economics*. 2020; 90: 104854. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104854>.
3. Герасимчук З.В., Синицын И.Б., Ктыря А.Г. Нефтяной кризис 2020 года: причины, последствия и пути решения. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2022; 5-1: 168-172. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2022-05-01-13>.
Gerasimchuk Z.V., Sinitsyn I.B., Ktryan A.G. The 2020 Oil Crisis: Causes, Consequences and Solutions. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2022; 5-1: 168-172. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2022-05-01-13>.
4. Колпаков А.Ю. Возможные траектории динамики мировой цены на нефть = Possible trajectories of world oil price dynamics. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2016; 10: 112-119. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2016-00123>.
Kolpakov A.Y. Possible Trajectories of World Oil Price Dynamics. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2016; 10: 112-119. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2016-00123>.
5. Toews G., Naumov A. The relationship between oil price and costs in the oil and gas industry. *The Energy Journal*. 2015; 36 (4): 137-162. <https://doi.org/10.5547/01956574.36.S11.gtoe>.
6. Mauritzen J. The effect of oil prices on offshore production: Evidence from the Norwegian Continental Shelf. *Energy Economics*. 2021; 97: 105190. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105190>.
7. Khalifa A.A., Caporin M., Hammoudeh S. The relationship between oil prices and rig counts: The importance of lags. *Energy Economics*. 2017; 63 213-226. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.01.015>.
8. Mohn K. The declining option value of oil companies' upstream assets: A real options approach. *Energy Strategy Reviews*. 2021; 38: 100717. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100717>.
9. Кокорев А.С. Влияние внешнеэкономических санкций 2022 года на развитие регионов России. *Культура и безопасность*. 2022; 2: 19-23. <https://doi.org/10.25257/KB.2022.2.19-23>.
Kokorev A.S. Impact of 2022 Foreign Economic Sanctions on the Development of Russian Regions. *Culture and Security*. 2022; 2: 19-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/KB.2022.2.19-23>.
10. Дегтярев К.Ю. Снижение эффективности санкций: анализ влияния санкционных ограничений 2022–2024 гг. *Государственное управление. Электронный вестник*. 2025; 108: 27-36. <https://doi.org/10.55959/MSU2070-1381-108-2025-27-36>.

Degtyarev K.Y. Declining Effectiveness of Sanctions: Analysis of the Impact of Sanction Restrictions 2022–2024. Public Administration. *Electronic Bulletin*. 2025; 108: 27-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU2070-1381-108-2025-27-36>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Виктор Сергеевич Павловский –

аспирант, аналитик товарных рынков, Санкт-Петербургский государственный экономический университет; Акционерное общество «Сбондс.ру», 196006, г. Санкт-Петербург; Российская Федерация; e-mail: senior.poplavskii@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2709-3107>

ABOUT THE AUTHOR

Victor S. Poplavsky –

PhD Candidate, Commodity Markets Analyst, Saint Petersburg State University of Economics, Cbonds.ru JSC, 196006, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: senior.poplavskii@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2709-3107>

Анализ и моделирование влияния климатических изменений на территории Северо-Востока России на стабильность и деформацию геодезических сетей и инженерных сооружений

В. В. Арно¹✉, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифулина¹, И. Д. Долбин¹

¹ ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт)»,
г. Магадан, Российская Федерация

² ВШГА МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

✉ vvnika@mail.ru

Резюме. Рассматривается влияние климатических изменений на стабильность и деформацию геодезических сетей и инженерных сооружений на территории Северо-Востока России. Проведен анализ основных климатических факторов: температуры, осадков и глубины промерзания – за период 2016–2025 годов на основе данных Гидрометцентра России. Используются методы математического моделирования деформаций, а также описательная статистика и многомерный регрессионный анализ, включающие учет геотехнических характеристик грунтов и сезонных колебаний. Результаты исследований демонстрируют существенное влияние климатических параметров на деформации и необходимость адаптивного мониторинга инженерных решений для обеспечения устойчивости инфраструктуры региона.

Ключевые слова: Северо-Восток России, климатические изменения, деформации, геодезические сети, модели прогнозирования, мониторинг стабильности, геотехнические характеристики

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы выражают благодарность коллегам ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет и сотрудникам СПбГУ, Институту наук о Земле за предоставленные материалы и консультации. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В. В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Долбин И.Д. Анализ и моделирование влияния климатических изменений на территории Северо-Востока России на стабильность и деформацию геодезических сетей и инженерных сооружений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):72-77. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-72-77>.

Analysis and modeling of the impact of climate change in the North-East Russia on the stability and deformation of geodetic networks and engineering structures

V. V. Arno¹✉, E. P. Kolesnichenko², I. Yu. Garifulina¹, I. D. Dolbin¹

¹ North-Eastern State University (Polytechnic Institute), Magadan, Russian Federation

² Higher School of Economics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉ vvnika@mail.ru

Abstract. This article analyzes the impact of climate change on the stability and deformations of geodetic networks and engineering structures in North-East Russia. The study covers key climatic factors – temperature, precipitation, and frost depth – from 2016 to 2025, based on data from the Russian Hydrometeorological Center. Methodologies include deformation mathematical modeling, descriptive statistics, and multivariate regression analysis, integrating geotechnical soil characteristics and seasonal variations. Results highlight significant effects of climatic factors on deformations and emphasize the need for adaptive monitoring and engineering measures to ensure infrastructure resilience in the region.

Keywords: climate change, deformations, geodetic networks, North-East Russia, predictive models, stability monitoring, geotechnical characteristics

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors express their gratitude to their colleagues at North-Eastern State

University and St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, for providing the materials and consultations. The research was funded by the authors.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. Analysis and modeling of the impact of climate change in the North-East Russia on the stability and deformation of geodetic networks and engineering structures. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):72-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-72-77>.

Введение

Регион Северо-Востока России характеризуется жесткими климатическими условиями, которые в последние годы испытывают заметные изменения, связанные с глобальным потеплением и аномалиями погодных режимов. Увеличение среднегодовой температуры, изменение режима осадков и сезонные колебания температуры способствуют нарушению устойчивости грунтов и, как следствие, геодезических сетей и инженерных сооружений. Изучение влияния этих климатических факторов критично для обеспечения точности геодезических измерений и безопасности эксплуатации объектов [1–4].

Исследование направлено на выявление закономерностей взаимодействия климатических факторов, таких как температура, осадки и глубина промерзания грунтов, с геодезическими процессами, влияющими на устойчивость инженерной инфраструктуры.

Цель исследований: анализ и моделирование влияния климатических изменений на стабильность и деформации геодезических сетей и инженерных сооружений на территории Северо-Востока России.

Материал и методы исследований

Для анализа были использованы климатические данные Гидрометцентра России за 2015–2025 годов, включая температуры воздуха, количество и тип осадков, сроки промерзания и оттаивания грунтов.

Применялись методики математического моделирования деформаций с использованием сезонных колебаний температуры в виде функции

$$D(t) = D_0 + A \sin(\omega t + \phi) + Bt + \epsilon(t), \quad (1)$$

где $D(t)$ – прогнозируемое значение деформации в момент времени t ;

D_0 – начальное смещение;

A – амплитуда сезонных колебаний, связанная с глубиной промерзания;

ω – циклическая частота (годовой период);

ϕ – фазовый сдвиг, учитывающий сезонность;

B – коэффициент тренда, отображающий долгосрочные изменения;

$\epsilon(t)$ – стохастическая ошибка измерений.

Моделирование интегрировалось с геотехническими характеристиками почв, включая коэффициенты теплопроводности и влажности, что учитывается в многопараметрической функции риска смещений [5–7].

В процесс исследований влияния климатических изменений на деформации геодезических сетей в Северо-Восточной России были так же включены следующие статистические методы:

Описательная статистика, используемая для первичного анализа исходных данных, характеризующая их основные свойства.

Среднее значение $\bar{x}$ отражает центральную тенденцию

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2)$$

Дисперсия S^2 и стандартное отклонение S измеряли разброс значений

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, S = \sqrt{S^2} \quad (3)$$

Коэффициент вариации $CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \%$ показывает относительную изменчивость параметра.

Коэффициенты асимметрии и эксцесса помогают выявить форму распределения.

В рассматриваемом регионе наблюдается, например, значительный рост средней годовой температуры с $0,7^\circ\text{C}$ (период 1960–1990 гг.) до $1,8^\circ\text{C}$ (1991–2012 гг.). Изменения осадков варьируются от $+5$ до $+60 \%$ в зависимости от местности и сезона.

2. Многомерный регрессионный анализ. Для количественной оценки влияния факторов климата на деформации геодезических сетей выявлены основные переменные: среднегодовая температура T , уровень осадков P и глубина промерзания грунта F .

Модель регрессии задается в виде

$$D = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 P + \beta_3 F + \epsilon, \quad (4)$$

где D – величина деформации;

β_0 – свободный член;

$\beta_{1,2,3}$ – коэффициенты регрессии, характеризующие влияние каждого фактора;

ϵ – случайная ошибка.

Параметры оценивались методом наименьших квадратов (МНК), минимизируя сумму квадратов отклонений

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^N (D_i - \beta_0 - \beta_1 T_i - \beta_2 P_i - \beta_3 F_i)^2 \quad (5)$$

3. Выбор параметров и кросс-валидация. Для обучения модели используется исторический набор данных по Северо-Востоку России за 1990–2025 годов с данными по температуре, осадкам, глубине промерзания и зарегистрированным деформациям.

Кросс-валидация (например, k -fold с $k = 5$) применялась для оценки устойчивости модели и ее способности к обобщению. Данные разбивались на пять равных частей, поочередно четыре части использовались для тренировки, одна – для теста [8–11].

Оценка метрики качества: коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \hat{D}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2}, \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_i - \hat{D}_i|, RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \hat{D}_i)^2}, (7)$$

где $\hat{D}_i$ – прогноз модели, $\bar{D}$ – среднее значение наблюдений.

Результаты исследований

Климатические показатели Северо-Востока России до 2025 года представлены в таблице 1.

Анализ климатических данных за последнее десятилетие показал увеличение среднегодовой температуры на 1,5–2 °С с тенденцией к повышению амплитуды сезонных колебаний [8–11].

На основе данных по среднегодовой температуре региона роста от 0,7 до 1,8 °С, увеличению суммарных осадков на 5–60 % и сезонным колебаниям глубины промерзания проводилось построение модели регрессии.

Из таблицы 1 видно, что в период с 2016 по 2025 год в регионе наблюдаются устойчивые изменения климатических параметров. Среднегодовая температура имеет тенденцию к постепенному повышению, что приводит к снижающейся глубине промерзания грунтов. Одновременно растет количество годовых осадков, что влияет на влажность и механические свойства грунта [11–14]. Эти данные создают предпосылки для изменения геотехнических условий территории, что необходимо учитывать при мониторинге и прогнозировании стабильности геодезических сетей и инженерных сооружений [15–16].

Наглядное представление этих тенденций и их взаимосвязи отражено на графиках изменения температуры, осадков и глубины промерзания за указанный период (рис. 1).

Таблица 1 / Table 1

Климатические показатели Северо-Востока России до 2025 года / Climate indicators for Northeast Russia until 2025

Параметр / Parameter	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Коэффициент инсоляции / Insolation coefficient, %	72	74	73	75	76	77	78	79	80	81
Влажность / Humidity, %	65	63	64	66	68	67	66	65	64	63
Давление, гПа / Pressure, hPa	1012	1011	1013	1010	1009	1008	1007	1006	1005	1004
Температура / Temperature, °C	-12,3	-11,8	-11,2	-11,5	-10,9	-10,7	-10,2	-9,9	-9,5	-9,2
Осадки / Precipitation (mm)	450	480	470	490	510	520	530	540	550	560
Глубина промерзания / Freezing depth (cm)	140	138	136	135	132	130	128	125	123	120

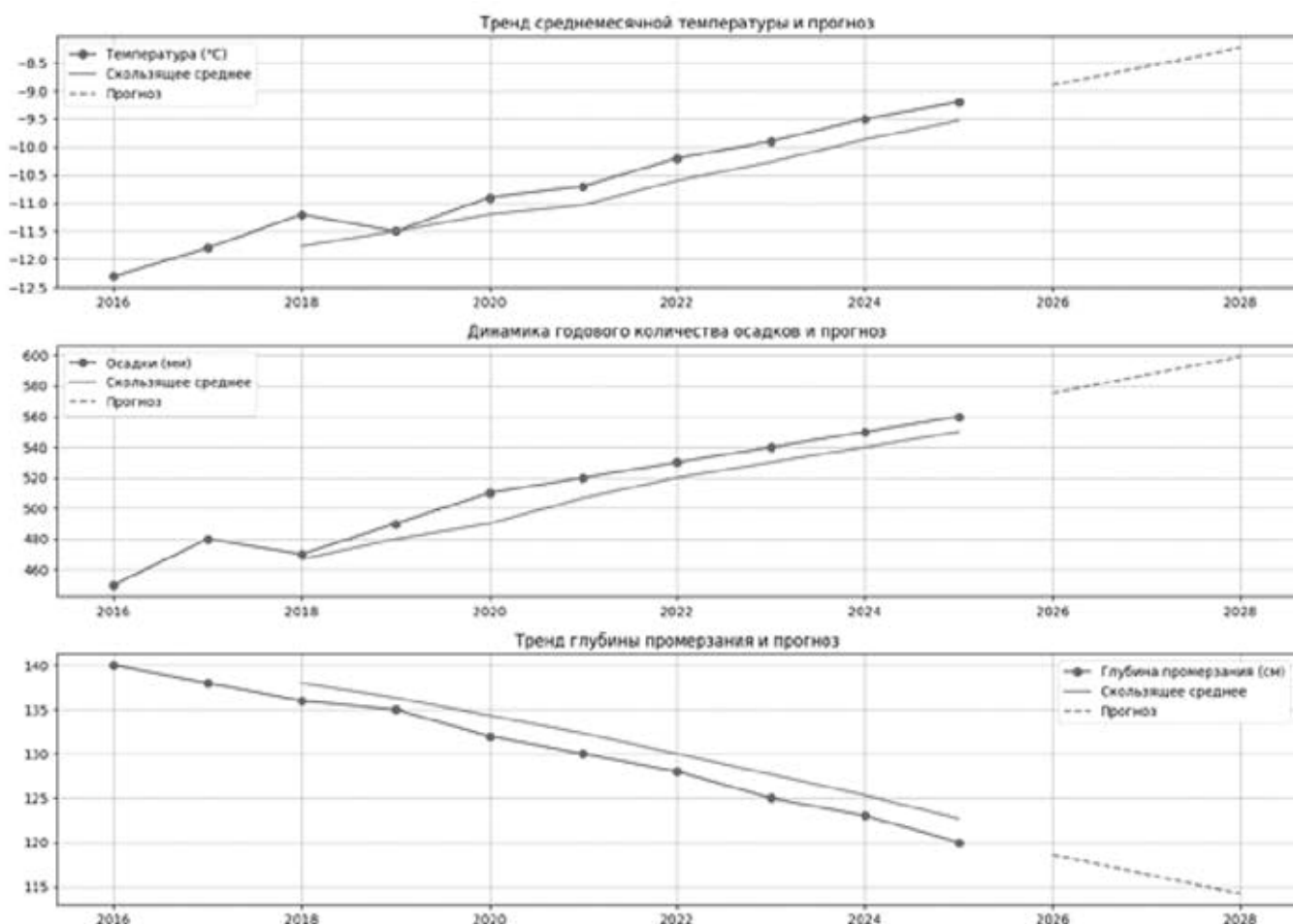


Рис. 1. Тренды климатических параметров (2016–2025 гг.) /
Fig. 1. Trends of climate parameters (2016–2025)

Тренд среднемесячной температуры воздуха (2016–2025 гг.) показывает устойчивое и значительное потепление региона. Температура повышается практически непрерывно, что совпадает с глобальными тенденциями климатического изменения и сопровождается уменьшением глубины промерзания грунтов. Динамика годового количества осадков за этот же период характеризуется постепенным увеличением. Рост осадков увеличивает влажность почвы и способствует изменению физико-механических свойств грунтов, что в результате может приводить к усилению деформационных процессов.

Тренд глубины промерзания грунта демонстрирует сокращение промерзлого слоя, что связано и с потеплением, и изменением режима осадков. Сокращение глубины промерзания ослабляет морозное пучение, но при этом может ухудшать способность грунта удерживать структурную прочность, что требует дополнительного контроля инженерных объектов. Корреляционная матрица (табл. 2) показывает устойчивые обратные связи между температурой и глубиной промерзания, а также прямую связь глубины промерзания и деформаций, что подчеркивает влияние климатических факторов на стабильность грунтов (рис. 2) [12–15].

Таблица 2 / Table 2
Корреляционная матрица / The correlation matrix

Параметр / Parameter	Температура / Temperature	Осадки / Precipitation	Глубина промерзания / Frost Depth	Деформации / Deformations
Температура / Temperature	1	0,46	-0,97	-0,63
Осадки / Precipitation	0,46	1	-0,45	0,15
Глубина промерзания / Frost Depth	-0,97	-0,45	1	0,63
Деформации / Deformations	-0,63	0,15	0,63	1

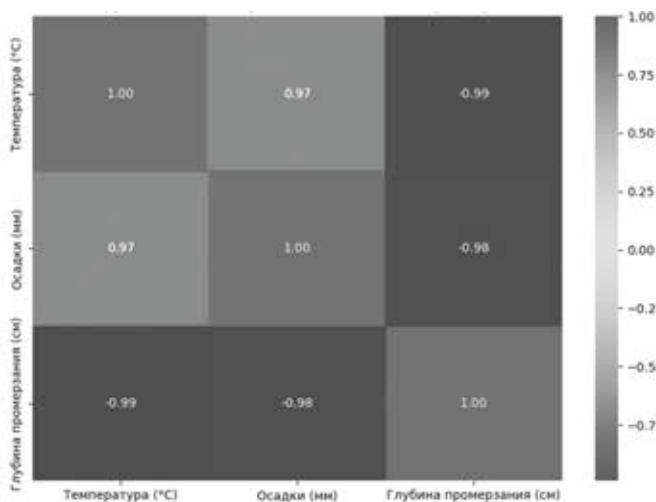


Рис. 2. Корреляционная матрица климатических параметров (2016–2025 гг.) /
Fig. 2. Correlation matrix of climate parameters (2016–2025)

Данные тенденции подтверждаются результатами статистического теста Манна – Кендала, который указывает на

значимость выявленных климатических трендов, и прогнозами, построенными с использованием методов скользящего среднего и линейной экстраполяции, показывающими сохранение и даже усугубление этих тенденций до 2028 года [16–17].

Величина деформаций геодезических сетей (мм) для анализа представлена данными с сетей мониторинга инфраструктуры региона (рис. 3).

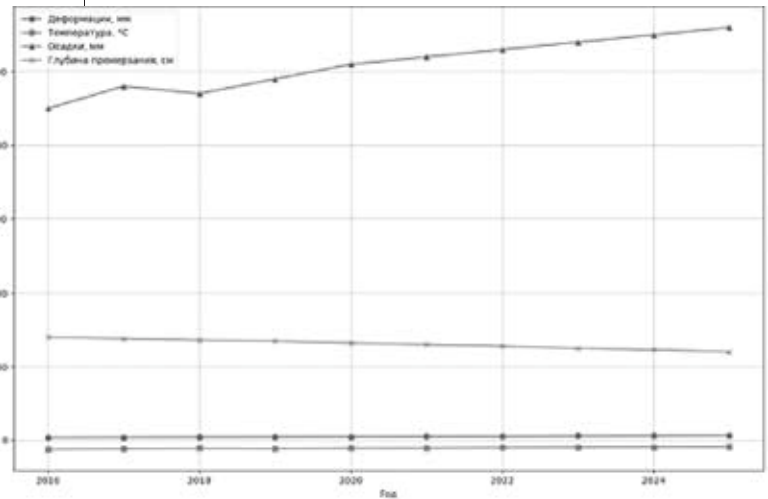


Рис. 3. Динамика деформаций и климатических факторов на Северо-Востоке России /
Fig. 3. Dynamics of deformations and climatic factors in the North-East of the Russian Federation

Эти деформации отражают совокупное влияние климатических факторов, изменений в грунтовых условиях и нагрузки на инженерные сооружения, что важно учитывать при мониторинге и эксплуатационном управлении объектов. Растущие значения свидетельствуют о необходимости внедрения дополнительных мер по контролю и укреплению устойчивости сетей и сооружений [16–17].

Модель показала статистически значимое влияние всех трех факторов с максимальным вкладом изменения температуры (коэффициент $\beta_1 > 0,4$), что отражает важность потепления для активации процессов растворения и пучения грунтов. Осадки и глубина промерзания также существенны для описания сезонных и долгосрочных деформаций.

Эти методы позволили количественно связать наблюдаемые климатические изменения с воздействием на устойчивость инженерных сооружений региона, что открывает перспективы для улучшения мониторинга и адаптивного проектирования.

Модели деформаций продемонстрировали, что сезонные эффекты существенно влияют на верхние слои грунтов с глубиной промерзания до 2 метров, что вызвало увеличение максимальных смещений до 12 мм в пределах геодезических сетей.

Прогноз тренда B по формуле показывает годовое увеличение дополнительной деформации порядка 0,5 мм/год, что может привести к накапливаемым нарушениям точности постройки и контролю инженерных сооружений без своевременного мониторинга и корректирующих мероприятий.

Обсуждение

Результаты исследований подчеркивают необходимость интеграции климатических параметров в системы монито-

ринга геодезических сетей, особенно в суровых климатических регионах Северо-Востока России.

Прогнозные модели позволяют своевременно выявлять зоны риска и планировать инженерные мероприятия по стабилизации грунтов и корректировке сетей. Особенно важна адаптация эксплуатационных нормативов с учетом усиления сезонных и долгосрочных колебаний деформаций.

Заключение

1. В ходе проведенного исследования подтверждена существенная роль климатических изменений в динамике деформаций геодезических сетей и инженерных сооружений на территории Северо-Востока России. Анализ показал, что увеличение среднегодовой температуры и изменений режима осадков оказывает прямое влияние на уменьшение глубины промерзания грунтов, что, в свою очередь, способствует усилению деформационных процессов и снижению устойчивости структур.

2. Многомерное моделирование с использованием климатических параметров продемонстрировало статистически

значимое влияние температуры, осадков и глубины промерзания на величину деформаций, что обосновывает необходимость интеграции климатических факторов в систему мониторинга и управления устойчивостью инженерных объектов региона.

3. Прогнозные модели, основанные на исторических данных и современных методах машинного обучения, позволяют выявлять зоны риска и своевременно принимать меры по стабилизации грунтов и корректировке геодезических сетей, что особенно важно в условиях усиливающихся климатических изменений.

4. Таким образом, результаты исследования подчеркивают необходимость перехода к адаптивным механизмам мониторинга и управления, учитывающим многопараметрические воздействия климата, для обеспечения точности геодезических измерений, безопасности и долговечности инфраструктуры Северо-Востока России. Будущие исследования должны быть направлены на развитие цифровых систем мониторинга с использованием интеллектуальных моделей прогнозирования и автоматических систем реагирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Абрамов Д.А., Макарьева О.М., Землянскова А.А., Осташов А.А. и др. Геотемпературный мониторинг криолитозоны Магаданской области 2021–2024 гг.: Тезисы доклада. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2024; 11: 450-456.
Abramov D.A., Makar'eva O.M., Zemlyanskova A.A., Ostashov A.A., et al. Abstract of the report "Geotemperature Monitoring of the Permafrost Zone in the Magadan Region in 2021–2024". *Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic, and North-West of Russia*. 2024; 11: 450-456 (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2024-11-450-456>.
- Веркулич С.Р., Демидов Н.Э., Анисимов М.А. Разработка проекта организации мониторинга многолетнемерзлых грунтов высокоширотной Арктики на базе наблюдательной сети Росгидромета. *Российские полярные исследования*. 2021; 43 (1): 23-27.
Verkulich S.R., Demidov N.E., Anisimov M.A. Development of a project for organizing monitoring of permafrost soils in the high-latitude Arctic based on the observation network of Roshydromet. *Russian Polar Research*. 2021; 43 (1): 23-27. (In Russ.).
- Ефимов В.М., Васильчук Ю.К., Рожин И.И. и др. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезонно-охлаждающими устройствами в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия). *Арктика и Антарктика*. 2017; 4: 86-97.
Efimov V.M., Vasilchuk Yu.K., Rozhin I.I., et al. Modeling the Temperature Regime of Soil Foundations with Seasonal Cooling Devices in the Cryolithozone of the Sakha Republic (Yakutia). *Arctic and Antarctic*. 2017; 4: 86-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25036>.
- Куштин В.И., Ревякин А.А., Соколова В.А. и др. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений. *Инженерный вестник Дона*. 2020; 11 (71): 27-37.
Kushtin V.I., Revyakin A.A., Sokolova V.A., et al. Modern Methods of Monitoring Deformations of Buildings and Structures. *Engineering Bulletin of the Don*. 2020; 11 (71): 27-37. (In Russ.).
- Макарьева О.М., Землянскова А.А., Абрамов Д.А. и др. Региональная система мониторинга многолетнемерзлых пород Магаданской области. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2023; 10: 192-195.
Makar'eva O.M., Zemlyanskova A.A., Abramov D.A., et al. Regional Monitoring System of Permafrost in the Magadan Region. *Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic, and North-West of Russia*. 2023; 10: 192-195. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-192-195>.
- Melnikov V.P., Osipov V.I., Bruchkov A.V., et al. Past and Future of Perma-frost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure. *Energies*. 2022; 15 (9): 3190. <https://doi.org/10.3390/en15093190>.
- Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В. Оценка возможности и точности применения GNSS-систем для мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2016; 4: 15.
Nesterenko M.Yu., Tsyvak A.V. Assessment of the Possibility and Accuracy of Using GNSS Systems for Monitoring Earth Surface Deformations at Hydrocarbon Deposits under Development. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 4: 15. (In Russ.).
- Нестеренко Ю.М., Цвяк А.В., Нестеренко М.Ю. Методические основы геодинамического мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2017; 4: 10.
Nesterenko Yu.M., Tsyvak A.V., and Nesterenko M.Yu. Methodological Foundations of Geodynamic Monitoring Using Global Navigation Satellite Systems. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2017; 4: 10. (In Russ.).
- Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж. и др. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. *Горная промышленность*. 2022; 5: 99-104.
Shevchuk R.V., Manevich A.I., Akmatov D.Zh., et al. Modern Methods, Techniques, and Technical Means of Monitoring Earthquake Movements. *Mining Industry*. 2022; 5: 99-104. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>.
- Юров Ф.Д. Особенности организации мониторинга линейных транспортных систем в криолитозоне. *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы Семнадцатой общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 29 ноября – 02 декабря 2022 года*. Москва, 2022: 234-242.

- Yurov F.D. Features of the organization of monitoring of linear transport systems in the permafrost zone. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation: Materials of the Seventeenth All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition of Surveying Organizations, Moscow, November 29 – December 02, 2022*. Moscow, 2022: 234-242. (In Russ.).
11. Harmening C., Neuner H. A spatio-temporal deformation model for laser scanning point clouds. *Journal of Geodesy*. 2020; 94 (2): 26. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01352-0>.
 12. Jahr T. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia / Germany. *Geodesy and Geodynamics*. 2018; 9 (3): 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.015>.
 13. Jahr T., Kroner C., Lippmann A. Strainmeters at Moxa observatory, Germany. *Journal of Geodynamics*. 2006; 41 (1-3): 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.017>.
 14. Liu L., Schaefer K., Zhang T., et al. Recent Warming Degradation of Permafrost in the Northern Hemisphere: A Multi-Model Assessment. *The Cryosphere*. 2021; 15: 1-25.
 15. Makarieva O.M., Zemlianskova A., Abramov D., et al. Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia). *Geosciences*. 2024; 14: 88. <https://doi.org/10.3390/geosciences14040088>.
 16. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*. 2022; 112(1): 231-251. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05179-6>.
 17. Telling J., Lyda A., Hartzell P., et al. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*. 2017; 169: 35-68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –

канд. техн. наук, доцент, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –

студентка направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит», ВШГА МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Ирина Юрьевна Гарифулина –

ст. преподаватель кафедры геологии и горного дела. Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Иван Дмитриевич Долбин –

студент направления подготовки направления «Горное дело», Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: dolbinivan42@gmail.com

Критерии авторства:

В. В. Арно, Е. П. Колесниченко – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; И. Ю. Гарифулина – оценка результатов и коррекция написанной работы; И. Д. Долбин – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.10.2025

Поступила после рецензирования: 13.11.2025

Принята к публикации: 17.11.2025

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Eva P. Kolesnichenko –

Student of the Field of Training "State and Municipal Audit", Higher School of Economics, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Irina Yu. Garifulina –

Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining. Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Ivan D. Dolbin –

Student of the Mining Department, North-Eastern State University Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: dolbinivan42@gmail.com

Contribution:

V. V. Arno., E.P. Kolesnichenko – research idea, formulation of the conflict between the current paradigm and new facts, and writing a scientific paper; I. Yu. Garifulina – evaluation of the results and correction of the written work; I. D. Dolbin – selection and collection of research materials.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 18.10.2025

Revised: 13.11.2025

Accepted: 17.11.2025

Применение вибрационных технологических датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере месторождения Наталка)

В. В. Арно^{1✉}, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифулина¹,
Н. Е. Ломакина¹, П. Е. Шаров¹

¹ ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт)»,
г. Магадан, Российская Федерация

² ВШЭ МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ vvnika@mail.ru

Резюме. Рассматривается использование вибрационных технологических (ВТ) датчиков для мониторинга деформаций и смещений породного массива в условиях карьерной отработки месторождения Наталка. Авторы подтвердили высокую эффективность применения ВТ-датчиков для выявления изменений в породном массиве. В ходе исследования установлена значительная активность деформаций в опасных зонах карьера, что иллюстрирует возможность ВТ-датчиков. Продемонстрирована высокая результативность мониторинга при выявлении зон с интенсивной деформационной активностью, что обеспечивает своевременную реакцию и предотвращение аварийных ситуаций.

Ключевые слова: месторождение Наталка, вибрационно-технологические датчики, мониторинг деформаций, смещения породного массива, карьерная отработка, активность деформаций, опасные зоны карьера

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллегам и сотрудникам АО «Полус Магадан» за предоставленные материалы и консультации. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Ломакина Н.Е., Шаров П.Е. Применение вибрационных технологических датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере месторождения Наталка). *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):78-83. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-78-83>.

Application of vibration technology sensors for monitoring deformations and displacements of rock mass in open-pit mining of deposits (on the example of the Natalka deposit)

V. V. Arno^{1✉}, E. P. Kolesnichenko², I. Yu. Garifulina¹, N. E. Lomakina¹, P. E. Sharov¹

¹ North-Eastern State University (Polytechnic Institute), Magadan, Russian Federation

² Higher School of Economics of Lomonosov Moscow, Russian Federation

✉ vvnika@mail.ru

Abstract. The article discusses the use of vibration technology (VT) sensors for monitoring deformations and displacements of the rock mass in the conditions of open-pit mining at the Natalka deposit. The authors have confirmed the high efficiency of using VT sensors to detect changes in the rock mass. The study has revealed significant deformation activity in the hazardous areas of the quarry, which demonstrates the potential of VT sensors. The study has also demonstrated the effectiveness of monitoring in identifying areas with intense deformation activity, which allows for timely response and prevention of accidents.

Keywords: Natalka deposit, vibration technology sensors, deformation monitoring, rock mass displacement, open-pit mining operation, deformation activity, hazardous pit zones

Acknowledgments: The authors express their gratitude to their colleagues and employees at Polyus Magadan JSC for the materials and consultations provided. The research was funded by the authors themselves.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Lomakina N.E., Sharov P.E. Application of vibration technology sensors for monitoring deformations and displacements of rock mass in open-pipe mining of deposits (on the example of the Natalka deposit). *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6): 78-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-78-83>.

Введение

Мониторинг деформаций и смещений горной массы является одной из ключевых задач маркшейдерского обеспечения безопасного и эффективного ведения открытых горных работ. Надежное и оперативное получение данных о состоянии горного массива позволяет своевременно выявлять участки с повышенной геодинамической активностью, предотвращая аварийные ситуации и оптимизируя горнотехнические мероприятия.

В современных условиях внедрение систем автоматизированного контроля, основанных на использовании вибрационных технологических (ВТ) датчиков, открывает новые возможности для непрерывного наблюдения за поведением горного массива в режиме реального времени. Применение таких датчиков позволяет значительно повысить точность и частоту снятия измерений, а также минимизировать влияние человеческого фактора.

Цель исследований: анализ опыта применения вибрационных технологических ВТ-датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере одного из крупнейших и наиболее сложных в плане геомеханики месторождений – месторождения Наталка).

Методы исследований

В работе анализируются методики установки датчиков, особенности обработки и интерпретации полученных данных, а также перспективы использования данной технологии для повышения безопасности и эффективности открытой отработки месторождений.

Для мониторинга были установлены ВТ-датчики в различных блоках отрабатываемой горной массы на месторождении Наталка. Схема расположения датчиков соответствовала проектной конфигурации по ключевым зонам возможных смещений. Данные с датчиков собирались после взрывных работ и в процессе деформирования пород. Измерялись минимальные, максимальные и средние величины смещений в миллиметрах. Система обеспечивала детектиро-

вание 98–100 % установленных датчиков, что гарантировало качество мониторинга. Анализ данных проводился путем статистической обработки информации по блокам и сравнения тенденций на протяжении времени [1–3].

Результаты исследований.

В ходе мониторинга за 2020 год было установлено и проанализировано более 300 ВТ-датчиков в различных блоках месторождения Наталка (табл. 1).

Например, в блоке 757.5-14 из 5 установленных датчиков (рис. 1) все были обнаружены (100 %), минимальное смещение составило 0,4 мм, максимальное – 1,4 мм, среднее – 1,0 мм.

Аналогично в блоке 757.5-16 из 3 датчиков среднее смещение достигало 2,96 мм. Общая статистика по большинству блоков показывала средние смещения от 1 до 3 мм с максимальными величинами до 6 мм. Процент обнаружения датчиков обычно превышал 90 %, что свидетельствовало о надежности системы мониторинга [4–6].

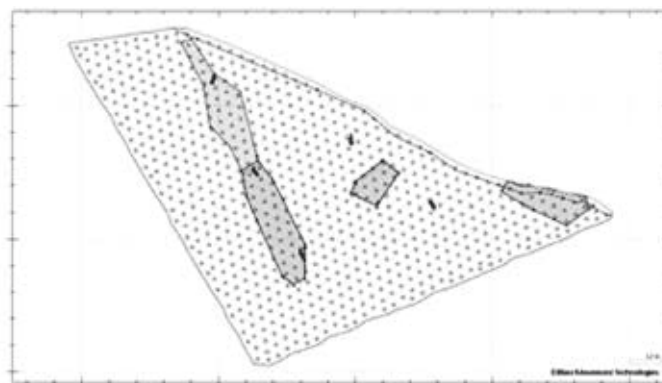


Рис. 1. Схема расположения датчиков блока 757.5-14 /
Fig. 1. Sensor layout diagram for block 757.5-14

В блоке 757.5-15 при 13 датчиках (рис. 2) минимальное смещение достигало 0,8 мм, максимальное – 3,3 мм, среднее – 1,95 мм.

Таблица 1 / Table 1

Анализ вибрационных технологических датчиков в различных блоках месторождения Наталка /
Analysis of VT sensors in various blocks of the Natalka deposit

Блок / Block	Установлено датчиков / Sensors Installed	Обнаружено датчиков / Sensors Detected	Процент обнаружения / Detection %	Мин. смещение / Min Displacement, mm	Макс. смещение / Max Displacement, mm	Среднее смещение / Mean Displacement, mm
757.5-14	5	5	100	0,4	1,4	1,0
757.5-15	13	13	100	0,8	3,3	1,95
757.5-16	3	3	100	2,2	3,7	2,96
765-34	2	2	100	1,0	1,5	1,25
780-55	13	13	100	1,1	4,5	2,6
780-56	5	5	100	1,6	4,9	3,34
757.5-17	5	5	100	0,9	3,4	2,4
757.5-18	6	6	100	1,2	2,4	2,2

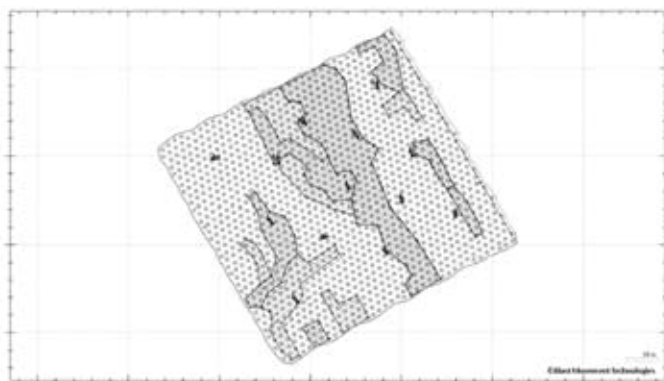


Рис. 2. Схема расположения датчиков блока 757.5-15 /
Fig. 2. Sensor layout diagram for block 757.5-15

Схемы расположения ВТ-датчиков демонстрировали равномерное покрытие ключевых зон наблюдения в блоках месторождения Наталка, обеспечивая надежный сбор данных. Установленное количество датчиков варьировалось от 2 до 13 на блок, что позволяло детально регистрировать локальные деформационные процессы [1–3].

Во всех проанализированных блоках обнаружение датчиков колебалось от 89 до 100 %, что указывало на высокую надежность системы (рис. 3).

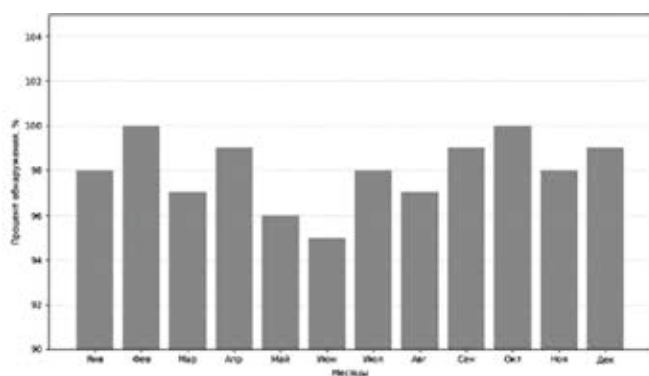


Рис. 3. Процент обнаружения вибрационных технологических датчиков по месяцам /
Fig. 3. Percentage of IMT sensor detections by month

Средние смещения варьировались от 0,5 до 3,3 мм, что позволяло констатировать контролируемый характер деформаций. График динамики средних смещений по времени для блоков 757.5-15 и 757.5-16 представлен на рисунке 4.

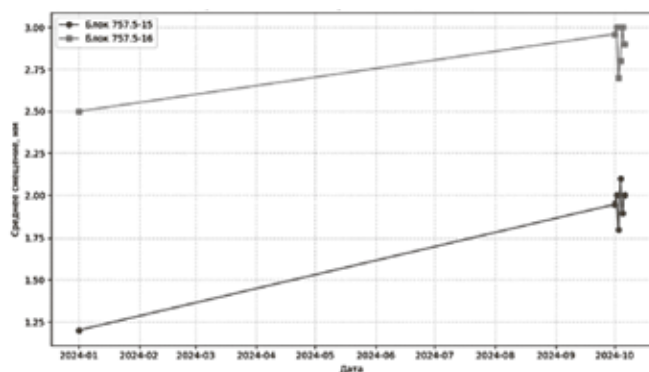


Рис. 4. Динамика средних смещений по времени для блоков 757-15 и 757-16 /
Fig. 4. Time-dependent average displacement dynamics for blocks 757-15 and 757-16

Анализ динамики средних смещений по времени для блоков 757.5-15 и 757.5-16 показал следующие ключевые особенности:

1. В обоих блоках наблюдался период начального роста средних смещений, что соответствовало активным этапам взрывных работ и перестройки горных масс. Это типично для режима, когда происходили интенсивные движения пород и формирование новых зон напряжений [7–10].

2. Максимальные значения смещений в блоке 757.5-16 значительно превышали аналогичные в блоке 757.5-15, что, возможно, связано с более высокой трещиноватостью, расположением или физико-механическими характеристиками горной массы. В литературе указано, что геологические особенности массива (трещиноватость, плотность пород) существенно влияют на величину и скорость смещений.

3. После достижения пиковых значений средние смещения в обоих блоках снижались, что свидетельствовало о стабилизации массива и перераспределении напряжений. Этот этап согласуется с фазой релаксации напряжений и снижением динамических воздействий после активной фазы подрыва. Снижение смещений в конце периода говорит о том, что горная масса адаптируется к новым условиям и технические меры контроля (например, крепление пород) работают эффективно, что подтверждается устойчивостью роста деформаций [11–13].

4. Разница в динамике между блоками указывает на неоднородность горных условий и подчеркивает необходимость индивидуального подхода к мониторингу и управлению деформациями для каждого блока.

Диапазон смещений представлен на комбинированной диаграмме (рис. 5).

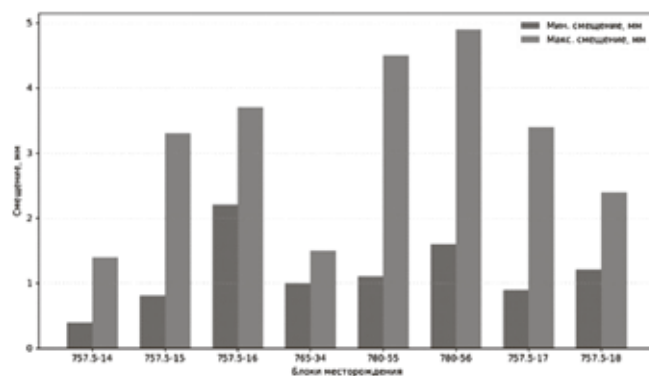


Рис. 5. Диапазон смещения в блоках месторождения Наталка /
Fig. 5. Offset range in the Natalka deposit blocks

Во всех блоках диапазон смещений достаточно выражен, что указывает на неоднородность деформационных процессов по горному массиву [10–13]. При этом максимальные смещения в некоторых блоках существенно превышают минимальные.

Например, блоки 780-56 и 780-55 имеют наиболее широкий диапазон смещений: максимальные значения достигают 4,9 и 4,5 мм соответственно, при минимальных смещениях на уровне 1,6–1,1 мм. Такое поведение может быть связано с особенностями геологического строения и локальными зонами повышенной трещиноватости или слабости горной массы в этих блоках.

В блоках 757.5-16 и 757.5-17 смещения находятся в среднем диапазоне: максимальные – около 3,4–3,7 мм, ми-

нимальные – от 0,9 до 2,2 мм. Эти данные свидетельствуют о более стабильном состоянии массива по сравнению с наиболее изменчивыми блоками, но с заметными локальными сдвигами.

Блоки с меньшим диапазоном смещений, например 765-34 и 757.5-14, характеризуются максимальными смещениями менее 1,5 мм, что говорит о большей сейсмической или механической стабильности данных участков. При этом размах смещений отражает неоднородность инженерно-геологических условий и требует комплексного подхода к мониторингу с учетом локальных особенностей каждого блока [13–15]. Большой размах указывает на необходимость усиленного контроля и, возможно, корректирующих мероприятий в особо уязвимых зонах.

Сопоставление минимальных и максимальных смещений позволяет оценить степень изменчивости и напряженности горного массива, а также адаптировать методы крепления и поддержания устойчивости в различных участках месторождения.

Обсуждение

1. В представленном исследовании выполнен анализ результатов мониторинга деформаций и смещений горной массы месторождения Наталка.

2. Анализ динамики средних смещений по времени на примере блоков 757.5-15 и 757.5-16 выявил характерные фазовые изменения. При этом наблюдался рост деформаций в периоды активных буровзрывных работ с последующим снижением смещений в конце периода, что указывает на процесс стабилизации горного массива и успешного перераспределения внутренних напряжений. Такая динамика согласуется с классическими моделями формирования и затухания деформаций в горных массах после взрывных воздействий, а также свидетельствует о корректной работе систем контроля [11–13].

3. Декомпозиция диапазонов смещений в отдельных блоках подтвердила неоднородность инженерно-геологических условий месторождения. Значительно различающиеся максимальные и минимальные смещения в блоках 780-55 и 780-56 по сравнению с более стабильными участками (например, 765-34, 757.5-14) подчеркивают необходимость индивидуального подхода к мониторингу и оценке рисков в каждом блоке. Это обусловлено вариациями структурно-тектонических характеристик и распределением трещиноватых зон, что влияет на пластичность и стабильность массива [12–15].

4. Результаты комбинированной диаграммы, отражающие размах смещений, демонстрируют, что в зонах с максимальными смещениями необходимо усилить меры контроля и, возможно, корректировать технологии горных работ. Одновременно участки с малыми диапазонами смещений могут служить ориентиром для оценки эффективности применяемых управления массивом.

Заключение

1. В статье приведены результаты исследований и анализ опыта применения вибрационных технологических ВТ-датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений Наталка.

2. Внедрение ВТ-датчиков на Наталке обеспечивает надежный и оперативный мониторинг деформаций, позволяет выявлять локальные особенности, а также своевременно принимать меры по снижению рисков неустойчивости.

3. Примененная методика мониторинга может быть рекомендована к масштабированию на аналогичные условия с целью повышения безопасности и эффективности горных работ.

4. Рекомендуется расширение применения ВТ-датчиков в аналогичных горных условиях с учетом специфики геологических и технологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Захаров В.Н., Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А. и др. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем. *Горный журнал*. 2021; 11: 45-52.
Zakharov V. N., Gvishiani A. D., Vaisberg L. A., et al. Big Data and Sustainable Functioning of Mining Systems. *Mining Journal*. 2021; 11: 45-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.06>.
- Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А. и др. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами. *Горный журнал*. 2022; 12: 55-61.
Zakharov V. N., Kaplunov D. R., Klebanov D. A., et al. Methodological approaches to standardization of data collection, storage and analysis in the management of mining systems. *Mining Journal*. 2022; 12: 55-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>.
- Захаров В.Н., Клебанов Д.А., Макеев М.А. и др. Анализ методов подготовки и преобразования информации, поступающей в хранилища данных для эффективного управления горнотехнической системой. *Горная промышленность*. 2023; 5S: 10-17.
Zakharov V. N., Klebanov D. A., Makeev M. A., et al. Analysis of Methods for Preparing and Converting Information Entering Data Stores for Effective Management of a Mining System. *Mining Industry*. 2023; 5S: 10-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-10-17>.
- Каган М.М., Чернобров Д.С. Мониторинг сейсмоактивности прибортового массива карьера на основе сейсморегистраторов в глубоких скважинах за конечным контуром. *Горная промышленность*. 2023; S1: 84-88.
Kagan M. M., Chernobrov D. S. Monitoring of Seismic Activity in the Quarry's Near-Surface Massif Based on Seismometers in Deep Wells Beyond the Final Contour. *Mining Industry*. 2023; S1: 84-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88>.
- Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А. и др. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий. *Горная промышленность*. 2023; 5S: 18-24.
Rasskazov I. Yu., Fedotova Yu. V., Anikin P. A., et al. Improvement of Methods and Means of Geomechanical Monitoring Based on Digital Technologies. *Mining Industry*. 2023; 5S: 18-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24>.
- Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М. и др. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020; 1: 53-57.
Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kagan M. M., et al. Principles of Organizing an Integrated System for Monitoring the Sustainability of Mining Enterprises. *Mining Journal*. 2020; 1: 53-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>.

- О.В. Структура комплексной системы мониторинга устойчивости объектов открытых горных работ с применением цифровых технологий. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. 2021; 4: 70-77.
- Rybin V.V., Konstantinov K.N., Nagovitsyn O.V. The structure of an integrated system for monitoring the stability of open-pit mining facilities using digital technologies. *Physical and Technical Problems of Mineral Deposits Development*. 2021; 4: 70-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210407>.
8. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Розанов И.Ю. Многоуровневый подход к организации мониторинга устойчивости бортов карьеров. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. 2021;5:106-113.
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Rozanov I.Yu. Multilevel approach to the organization of monitoring the stability of quarry slopes. *Physical and technical problems of mining*. 2021;5:106-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210510>.
 9. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Рыбин В.В. и др. Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных. *Горная промышленность*. 2024; 4: 121-128.
Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Rybin V.V., et al. Control and Management of the Geomechanical State and Stability of Structural Elements of Mining Structures in Quarries Based on the Collection and Analysis of Big Data. *Mining Industry*. 2024; 4: 121-128. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-121-128>.
 10. Хакулов В.А., Шаповалов В.А., Игнатов В.Н. и др. Совершенствование методологии мониторинга геомеханического состояния и трансформации свойств массивов горных пород для обеспечения безопасности и эффективности геотехнологии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 68-83.
Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Ignatov V.N., et al. Improving the Methodology of Monitoring the Geomechanical State and Transformation of Rock Mass Properties to Ensure the Safety and Efficiency of Geotechnologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 9: 68-83. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_68.
 11. Barnewold L., Lottermoser B.G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020; 30 (6): 747-757. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003>.
 12. He M., Xia H., Jia X., et al. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012; 4 (2): 97-114. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00097>.
 13. Jiang F.F., Zhou H., Liu C., et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines. *China Journal of Rock Mechanic Engineering*. 2019; 38 (5): 956-972.
 14. Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018; 246: 361-373. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2018.10.005>.
 15. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28 (5): 829-837. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.09.002>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –

канд. техн. наук, доцент, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –

студентка направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит», ВШГА МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Ирина Юрьевна Гарифулина –

ст. преподаватель кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Наталья Евгеньевна Ломакина –

старший преподаватель кафедры горного дела, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Павел Егорович Шаров –

студент направления подготовки «Горное дело», Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: sharov.pavel2005@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Eva P. Kolesnichenko –

Student of the Field of Training "State and Municipal Audit", Higher School of Economics, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Irina Yu. Garifulina –

Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining, Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Natalia E. Lomakina –

senior lecturer of the Mining Department, Northeastern State University Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Pavel E. Sharov –

Student of the Mining Department, North-Eastern State University Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: sharov.pavel2005@gmail.com

Критерии авторства:

В. В. Арно, И. Ю. Гарифулина – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы, оценка результатов и коррекция написанной работы; Н. Е. Ломакина, Е. П. Колесниченко, П. Е. Шаров – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.10.2025

Поступила после рецензирования: 19.11.2025

Принята к публикации: 22.11.2025

Contribution:

V. V. Arno, I. Yu. Garifulina – research idea, formulation of the conflict between the current paradigm and new facts, writing a scientific paper, evaluation of the results and correction of the written work; N. E. Lomakina, E. P. Kolesnichenko, P. E. Sharov – selection and collection of research materials.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 05.10.2025

Revised: 19.11.2025

Accepted: 22.11.2025

Особенности влияния многократной подработки на продолжительность процесса сдвижения земной поверхности

Ф. М. Голубев✉, К. В. Репина

ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, Российская Федерация

✉ f_golubev@list.ru

Резюме. На основании аналитического обзора существующих исследований в вопросе влияния свойств горного массива на продолжительность процесса сдвижения земной поверхности при ее подработке очистными горными выработками, а также анализа результатов натурных наблюдений на маркшейдерской наблюдательной станции приведены факторы, определяющие сроки проявления оседаний, вызванных подземной добычей угля. Проведен анализ способов расчета продолжительности процесса сдвижения и параметров зон влияния при движении очистного забоя. Установлена взаимосвязь отклонения фактического и расчетного времени сдвижения земной поверхности с кратностью подработки и обосновано влияние изменения упругих характеристик массива при подработке на продолжительность процесса сдвижения. Приведенные исследования позволяют уточнить методы определения продолжительности процесса сдвижения, что в свете планируемого восстановления промышленности и инфраструктуры Донбасса является крайне важной научно-технической задачей.

Ключевые слова: подработка угленосного массива, свойства горных пород, Донецко-Макеевский угленосный район, лава, мульда сдвижения, граничные углы, модуль Юнга

Благодарности, признательность, финансирование: Результаты, описанные в статье, получены в рамках выполнения работы FRSR-2024-0002 «Исследование деформированного состояния и геофизических свойств подработанного угленосного массива».

Для цитирования: Голубев Ф.М., Репина К.В. Особенности влияния многократной подработки на продолжительность процесса сдвижения земной поверхности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):84-89. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-84-89>.

Features of the influence of multiple part-time work on the duration of the earth's surface displacement process

F. M. Golubev✉, K. V. Repina

FSBI "Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Surveying", Donetsk, Russian Federation

✉ f_golubev@list.ru

Abstract. Based on an analytical review of existing studies on the influence of the properties of a mountain range on the duration of the process of shifting the Earth's surface during its mining operations, as well as an analysis of the results of field observations at a surveying observation station, the factors determining the timing of subsidence caused by underground coal mining are presented in the article. The analysis of methods for calculating the duration of the displacement process and the parameters of the zones of influence during the movement of the cleaning face is carried out. The relationship between the deviation of the actual and estimated time of displacement of the earth's surface with the frequency of additional work is established and the influence of changes in the elastic characteristics of the array during additional work on the duration of the displacement process is substantiated. The above studies make it possible to clarify the methods for determining the duration of the displacement process, which is an extremely important scientific and technical task in the light of the planned restoration of industry and infrastructure in Donbass.

Keywords: Mining of the carboniferous massif, properties of rocks, Donetsk-Makeevsky coal-bearing region, lava, mulda displacement, boundary angles, Young's module

Acknowledgments, funding, financial Support: The results described in the article have been obtained as part of research project FRSR-2024-0002 “Research into the strain state and geophysical properties of an undermined coal-rock mass”.

For citation: Golubev F.M., Repina K.V. Features of the influence of multiple part-time work on the duration of the earth's surface displacement process. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):84-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-84-89>.

Введение

Подземные очистные работы на угольных шахтах при управлении кровлей полным обрушением вызывают оседания горного массива и деформации земной поверхности. Подавляющее большинство муниципальных образований и урбанизированных территорий угледобывающих регионов многократно подработано очистными выработками, что негативно сказывается на объектах социальной и производственной инфраструктуры, расположенных на подрабатываемой территории, приводит к их повреждениям, вплоть до потери ими деформационного ресурса и утраты безопасного эксплуатационного состояния.

В пределах основных угленосных районов Донбасса в разное время отрабатывалось более чем 20 угольных пластов. Свойства многократно подработанного углепородного массива существенно отличаются от характеристик горного массива при его первичной подработке, что приводит к возникновению погрешностей при прогнозе геомеханических и геодинамических процессов. Из-за необходимости обеспечения техногенной безопасности окружающей среды в горнодобывающих регионах становится актуальным вопрос проведения дополнительных исследований характера сдвижения подработанного углепородного массива для установления закономерностей изменений физических параметров массива горных пород на подработанных территориях с параметрами деформаций земной поверхности.

Методика прогноза деформаций земной поверхности, описанная в отраслевых стандартах^{1,2} ГСТУ 101.00159226.001-2003 и ПБ 07-269-98, не учитывает влияние физико-механических свойств горных пород подрабатываемого углепородного массива на параметры сдвижения. Однако, согласно исследованиям [1], прочностные характеристики горных пород в различных районах Донбасса могут различаться в 5–10 раз. Стоит отметить, что свойства могут изменяться и в процессе многократной подработки. Игнорирование структурных особенностей горного массива приводит к существенным отклонениям расчетных величин деформаций земной поверхности и продолжительности процесса сдвижения от фактических [2, 3].

Влияние подработки на изменение структуры горного массива и параметры процесса сдвижения отмечают в работах авторы [4–12]. Изменение упругих свойств горных пород, согласно базовым физическим законам, должно приводить как к изменению граничных углов, так и провоцировать изменение продолжительности процесса сдвижения земной поверхности. Исследования изменения граничных углов, в зависимости от упругих свойств горного массива, требуют

проведения ряда дополнительных полевых работ, однако на моделях подобные закономерности были получены в работе [13]. Вопрос же влияния упругих свойств горного массива на параметры продолжительности процесса сдвижения в современных источниках освещен лишь косвенно.

В работах [7–9] описано влияние горно-геологических условий отработки на абсолютные величины сдвижения земной поверхности. Автор определяет характер влияния литологического состава горного массива на размеры оседаний, что подразумевает при прочих равных условиях и изменение продолжительности процесса сдвижения, однако вопрос времени проявления деформаций автором не освещается.

Авторы [10] на основе комплексных натурных инструментальных наблюдений установили аналитическую зависимость продолжительности процесса сдвижений и деформаций подработанного слоистого массива горных пород от горнотехнических условий при больших глубинах. Автор [14] приводит результаты объемной работы по исследованию скорости подвигания очистного забоя на временные параметры процесса сдвижения, что так же косвенно указывает на взаимосвязь продолжительности процесса с упругими параметрами массива, однако не дает прямого подтверждения данного факта.

Все описанные исследования подчеркивают наличие влияния упругих параметров горного массива на продолжительность процесса сдвижения. Согласно исследованиям [15, 16], принципиальное изменение структуры горного массива происходит при многократной подработке. Поскольку территория Донбасса подрабатывалась на различных участках как минимум двумя пластами, определение наличия влияния многократной подработки на продолжительность процесса сдвижения в свете планируемого восстановления промышленности и инфраструктуры Донбасса является крайне важной научно-технической задачей.

Погрешности в величинах определения продолжительности процесса сдвижения могут приводить к несвоевременному применению мер защиты объектов поверхности от деформаций, вызванных влиянием горных выработок. Это создает риски критических повреждений для подрабатываемых зданий, сооружений и объектов транспортного сообщения.

Цель исследований: установление взаимосвязи структурных особенностей горного массива с продолжительностью процесса сдвижения.

Методы исследований

Для оценки степени влияния многократной подработки на продолжительность процесса сдвижения проводился факторный анализ изменения граничных условий сдвижения горных пород при многократной подработке и определялась степень отклонения зафиксированной продолжительности сдвижения земной поверхности на наблюдательных станциях от результатов расчета продолжительности по нормативным методикам.

Общая продолжительность процесса сдвижения (T , мес)

¹ Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. ГСТУ 101.00159226.001. Донецк, 2004. 128.

² Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. ПБ 07-269-98. Москва, 1998. 203.

от влияния отдельной очистной выработки, согласно действующему в РФ нормативному документу ПБ 07-269-98, определялось следующим образом:

– при подвигании очистного забоя по простиранию

$$T = k_T \frac{H}{C} (ctg \delta_0 + ctg \psi_3); \quad (1)$$

– при подвигании очистного забоя по падению

$$T = k_T \frac{H}{C} \left(\frac{\cos(\psi_1 + \alpha)}{\sin \psi_1} + \frac{\cos \beta_0}{\sin(\beta_0 + \alpha)} \right); \quad (2)$$

– при подвигании очистного забоя по восставанию

$$T = k_T \frac{H}{C} \left(\frac{\cos \gamma_0}{\sin(\gamma_0 - \alpha)} + \frac{\cos(\psi_2 - \alpha)}{\sin \psi_2} \right), \quad (3)$$

где δ_0 , β_0 , γ_0 – граничные углы, определяемые по рекомендациям раздела 7 ПБ 07-269-98;

ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 – углы полных сдвижений, определяемые по рекомендациям раздела 7 ПБ 07-269-98;

H – глубина залегания пласта под рассматриваемой точкой;

α – угол падения пласта.

На территории Донбасса продолжительность процесса сдвижения определялась на основании таблицы 5.2, приведенной в документе ГСТУ 101.00159226.001-2003¹.

Как первый, так и второй методы не содержат параметров, учитывающих упругие характеристики, что при определенных горнотехнических условиях может приводить к существенным погрешностям в расчетах.

Исследование прочностных характеристик песчаников, расположенных на различных глубинах в пределах Донецко-Макеевского угленосного района Донбасса, позволяет установить взаимосвязь глубины с пределом прочности на сжатие горных пород, которая изображена на рисунке 1.

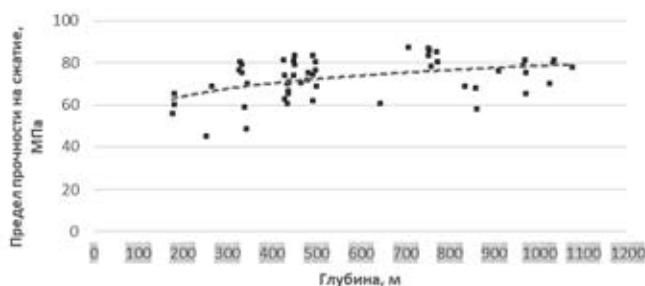


Рис. 1. Изменение предела прочности горных пород на сжатие с увеличением глубины /

Fig. 1. Change in the compressive strength of rocks with increasing depth

В свою очередь, зависимость продолжительности процесса сдвижения от глубины, согласно таблице 5.3¹ ГСТУ 101.00159226.001-2003, может быть установлена из выражения

$$T = k_v \cdot H + 1, \quad (4)$$

где k_v – коэффициент, отражающий скорость подвигания очистного забоя и варьирующийся в пределах от 0,0113 при

¹ Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. ГСТУ 101.00159226.001. Донецк, 2004. 128.

скорости более 100 м/месяц до 0,0504 при скорости менее 20 м/месяц.

Анализ формул (1) – (4) и рисунка 1 позволяет утверждать, что изменение прочностных и упругих свойств горных пород ведет к изменению продолжительности процесса сдвижения и требует проведения дополнительных исследований.

Для определения влияния многократной подработки на продолжительность процесса сдвижения были проанализированы материалы натурных наблюдений шахты «Ждановская». В геологическом строении участка, на котором расположена шахта, принимают участие отложения среднего карбона C_2^6 . Четвертичные отложения представлены суглинками и глинами с известковистыми включениями, обломками карбоновых пород в виде щебня и песчаных частиц. Мощность четвертичных отложений – 1,5-15,0 м. Перекрыты они почвенно-растительным слоем мощностью 0,20-0,40 м. Каменноугольные отложения представлены неравномерным чередованием различных по мощности и литологическому составу слоев глинистых и песчаных сланцев, песчаников, известняков и маломощных слоев углей и углистых сланцев.

В процентном отношении каменноугольная толща распределяется по литотипам следующим образом:

- песчаные и глинистые сланцы – 55,1 %;
- песчаники – 34,9 %;
- известняки – 6,4 %;
- угли и углистые сланцы – 3,6 %.

В геолого-структурном отношении участок расположен в центральной части южного крыла Чистяково-Снежнянской синклинали. На территории шахтного поля простирание пород с востока на запад по азимуту 90°, падение северное с углами 16–20°.

На рассматриваемой площади велась подработка земной поверхности по двум угольным пластам: пласту m_3 простого строения геологической мощностью 1,05 м и по пласту l_7 простого строения геологической мощностью 1,15 м.

Для текущих геологических условий продолжительность процесса сдвижения и длительность его активной стадии определялась по таблице 5.3 ГСТУ 101.00159226.001-2003, так как в ПБ 07-269-98 отсутствуют данные для данного региона.

Наблюдения проводились над 9-й восточной лавой пласта l_7 . Длина лавы вкрест простирания составляет 300 м. Длина лавы по простиранию составляла 3 093 м. Средняя вынимаемая мощность пласта была равна 1,19 м. Средний угол падения пласта составлял 16°. Средняя глубина подработки (в центре лавы) – 707 м. Со стороны восставания на расстоянии 37 м от лавы расположена 8-я восточная лава. По падению, простиранию и со стороны, обратной простиранию, очистные выработки отсутствуют.

При средней глубине отработки, равной 707 м, и скорости подвигания забоя лавы, равной 45 м/месяц, продолжительность процесса сдвижения лавы, согласно ГСТУ 101.00159226.001-2003, должна составлять 23 месяца.

За начало процесса сдвижения земной поверхности при удалении лавы от разрезной выработки принимался момент времени, когда очистной забой отходил от разрезной выработки на расстояние $C = A_0 H$, где A_0 – коэффициент, который определяется по ГСТУ 101.00159226.001-2003, а H – средняя глубина разработки лавы.

В нашем случае для 9-й восточной лавы угол сдвижения δ составлял 80°, соответственно, коэффициент A_0 был равен

0,3. Но так как лава была ранее подработана, то $A_0 = 0,15$. Тогда за начало процесса сдвижения следует принять момент времени, когда очистной забой отойдет от разрезной выработки на расстояние, равное $0,15 \times 707 = 106,1$ м. При скорости подвигания лавы, равной 45 м/месяц, это расстояние будет пройдено за 2,4 месяца, то есть процесс сдвижения активизируется спустя 72 суток после начала движения забоя 9-й восточной лавы пласта l_7 .

Длительность отработки 9-й восточной лавы при скорости движения забоя 45 м/месяц составит 68,7 месяца. Таким образом, от начала движения забоя 9-й восточной лавы до окончания процесса сдвижения земной поверхности должно пройти 91,7 месяца.

Для наблюдения за параметрами процесса сдвижения была заложена наблюдательная станция вдоль дороги г. Ждановка – г. Кировское (рис. 2).



Рис. 2. Схема закладки наблюдательной станции /
Fig. 2. The Scheme of laying the observation station

Границы зон влияния горных выработок на земную поверхность определялись в соответствии с документом¹ ГСТУ 101.00159226.001-2003 и учетом исследований [17–18], проведенных в РАНМИ в области изменения зон влияния в направлении падения угольных пластов.

Согласно результатам расчетов зона, влияния 9-й восточной лавы пласта l_7 на конец 2018 года только начинает оказывать воздействие на точки 10–15. В соответствии с методикой прогноза, описанной в документе¹ ГСТУ 101.00159226.001-2003, процесс сдвижения в этих точках должен продолжаться не менее 23 месяцев и стабилизироваться в конце 2020 года. Анализ графика, приведенного на рисунке 3, свидетельствует о существенно большей скорости протекания процесса сдвижения.

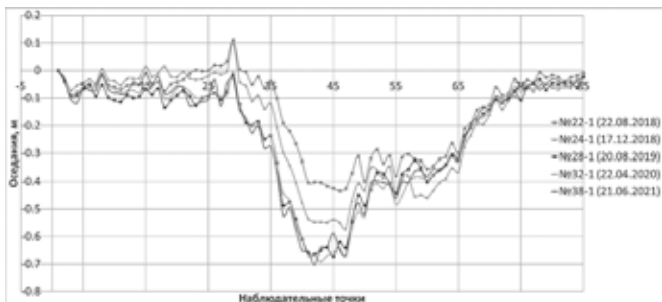


Рис. 3. Результаты измерений оседаний на наблюдательной станции в зоне влияния 9-й восточной лавы пласта l_7 /
Fig. 3. The results of measurements of subsidence at the observation station in the zone of influence of the 9th eastern lava formation l_7

Так, согласно данному графику, полная реализация процесса сдвижения произошла уже через 8 месяцев после достижения лавой положения, при котором зона влияния выработок покрывает все репера наблюдательной станции. Стоит отметить, что реализация оседаний для реперов, находящихся ближе к центральной части лавы (точки 35–45), потребовала порядка двух лет с момента попадания данных реперов в зону влияния горной выработки.

Результаты исследований

При определении продолжительности процесса сдвижения следует учитывать динамику хода лавы и возможность полной реализации сдвижений задолго до остановки очистного забоя. На основании анализа натурных наблюдений фиксировалось наличие изменения продолжительности сдвижения от центра мульды к ее краям. При определении причин неравномерного распределения продолжительности процесса сдвижения на различных участках наблюдательной станции также анализировалась степень подработанности горного массива.

В результате такого анализа было установлено, что на участке проведения наблюдений отработано два пласта, а в зону влияния 9-й восточной лавы пласта l_7 попадают зоны влияния еще трех горных выработок 7-й, 8-й восточных лав пласта l_7 и 10-бис восточной лавы пласта m_3 (рис. 4).

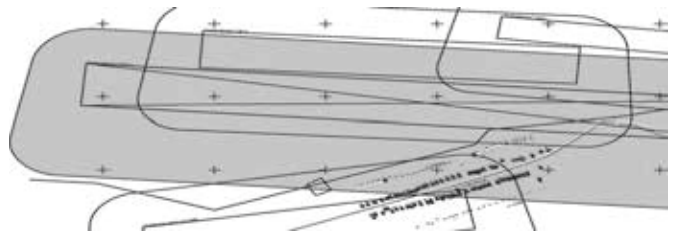


Рис. 4. Зоны влияния горных выработок, пересекающиеся с зоной влияния 9-й восточной лавы пласта l_7 /
Fig. 4. Zones of influence of excavations intersecting with the zone of influence of the 9th eastern lava formation l_7

Анализ рисунка 4 с учетом вышесказанного позволяет зафиксировать совпадение участка влияния надработавшей ранее лавы l_7 10-бис восточной лавы пласта m_3 с участком существенного ускорения процесса сдвижения, что свидетельствует о наличии взаимосвязи многократной подработки с продолжительностью процесса сдвижения.

В результате проведенных исследований было установлено, что существенное ускорение процесса сдвижения в нижней части мульды сдвижения может быть обосновано влиянием многократной подработки. Согласно исследованиям [4–5, 19], в результате многократной подработки горный массив существенно изменяет упругие характеристики, в частности проницаемость горных пород может увеличиваться до пяти порядков. Изменение проницаемости тесно взаимосвязано с изменением упругих свойств горного массива.

Определение такой взаимосвязи, согласно [6], можно определить из соотношения

$$E = 8,1 \cdot T_s (1/k_{pr})^{1/2}, \quad (8)$$

где E – модуль Юнга, МПа;

T_s – эффективная поверхностная энергия, Дж/м²;

k_{pr} – коэффициент проницаемости, Дарси.

При этом коэффициент проницаемости является расчетной величиной, которая может определяться согласно формуле

$$k_{пр} = \frac{K_{\phi} \cdot (\mu \cdot 1000)}{\alpha \cdot \gamma} \quad (9)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут;

μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;

α – коэффициент размерности; если K выражен в сантиметрах в секунду, то $\alpha = 1$; если в метрах в сутки, то $\alpha = 864$;

γ – удельная масса воды, $1 \cdot 10^3$ кг/м³ [20].

Из-за того, что коэффициент фильтрации в зоне полных сдвижений может изменяться в несколько десятков раз, происходит соразмерное изменение коэффициента проницаемости, а соответственно, и упругих свойств горных пород, что является прямым обоснованием изменения продолжительности процесса сдвижения при многократной подработке.

Заключение

Проведенный анализ натурных наблюдений и аналитический обзор существующих исследований в вопросе влияния

свойств горного массива на продолжительность процесса сдвижения позволили прийти к следующим выводам:

1. Продолжительность процесса сдвижения, вызванного подработкой земной поверхности, напрямую взаимосвязана с упругими параметрами горного массива, и техногенное изменение таких параметров ведет к изменению сроков проявления оседаний.

2. Взаимосвязь скорости подвигания очистного забоя, глубины отработки лавы и кратности подработки горного массива может быть выражена через зависимости модуля упругости от фильтрационных характеристик массива, которые возможно определить методом опытной откачки.

3. Влияние многократной подработки может сокращать продолжительность процесса сдвижения в несколько раз, однако для определения степени влияния количества отработанных ранее пластов на изменение сроков реализации оседаний необходимо проведение дополнительных исследований с применением моделирования и анализом широкого спектра горнотехнической документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Борисенко Э.В. Изменение прочностных характеристик образцов горных пород угленосных массивов Донбасса в процессе длительного водонасыщения. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023; 10 (3): 25-29. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100304>.
Borisenko E.V. Changes in the strength characteristics of rock samples of Donbass coal-bearing massifs during prolonged water saturation. *Fundamental and applied issues of Mining Sciences*. 2023; 10 (3): 25-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100304>.
- Грищенко Н.Н., Скаженник В.Б., Бардакова Е.А. и др. Пространственное моделирование зон многократной подработки горными выработками участков со сложной структурой рельефа. *Журнал теоретической и прикладной механики*. 2024; 3 (88): 89-99. <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2024-3-89-99>.
Grishchenkov N.N., Skazhenik V.B., Bardakova E. A., et al. Spatial modeling of zones of multiple mining of sites with a complex relief structure. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024; 3 (88): 89-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2024-3-89-99>.
- Иванов И.Ю., Шурыгин Д.Н. Математическое моделирование мульды сдвижения земной поверхности с учетом дифференцированного строения массива горных пород. Новочеркасск, 2010: 108.
Ivanov I.Yu., Shurygin D.N. Mathematical modeling of the Earth's surface displacement trend taking into account the differentiated structure of the rock mass. Novocherkassk, 2010: 108. (In Russ.).
- Дрибан В.А., Дуброва Н.А. Фильтрационная модель многократно подработанного массива. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2017; 7 (50): 31-37.
Driban V.A., Dubrova N.A. Filtration model of a repeatedly processed massif. *Collection of scientific papers of the Donbass State Technical University*. 2017; 7 (50): 31-37. (In Russ.).
- Кулибаба С.Б., Рожко М.Д., Хохлов Б.В. Определение точек максимальных наклонов в мульде сдвижения. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна*. 2009; 9 (143): 158-167.
Kulibaba S.B., Rozhko M.D., Khokhlov B.V. Determination of the points of maximum slopes in the flow of displacement. *Sciences of the Donetsk National Technical University. Series: Girmicho-geologichna*. 2009; 9 (143): 158-167. (In Russ.).
- Семашко С.В. Современные движения флюидов в земной коре. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2011; 2: 51-67.
Semashko S.V. Modern movements of fluids in the Earth's crust. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2011; 2: 51-67. (In Russ.).
- Посыльный Ю.В. Методика исследования влияния толщи горных пород на максимальное оседание земной поверхности. *Неделя горняка*. 2007; 2: 115-123.
Posylny Yu.V. Methodology for studying the influence of rock strata on the maximum subsidence of the Earth's surface. *Miner's Week*. 2007; 2: 115-123. (In Russ.).
- Посыльный Ю.В. Линия симметрии главного сечения мульды сдвижения земной поверхности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2004; 5: 150-152.
Posylny Yu.V. The line of symmetry of the main section of the Earth's surface displacement trough. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2004; 5: 150-152. (In Russ.).
- Посыльный Ю.В. Расчет граничных углов сдвижения по новым геометрическим элементам мульды в условиях шахты восточная ОАО «Ростовуголь». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000; 6: 123-126.
Posylny Yu.V. Calculation of boundary angles of displacement by new geometric elements of the mulch in the conditions of the Vostochnaya mine of Rostovugol OJSC. *Mining information and Analytical bulletin*. 2000; 6: 123-126. (In Russ.).
- Ларченко В.Г., Маталкина Ю.А., Шпакова А.О. Определение продолжительности процесса сдвижения подработанной толщи пород и земной поверхности. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института*. 2023; 30 (73): 27-34.
Larchenko V.G., Matalkina Yu.A., Shpakova A.O. Determination of the duration of the process of shifting the accumulated rock strata and the Earth's surface. *Collection of scientific papers of the Donbass State Technical Institute*. 2023; 30 (73): 27-34. (In Russ.).
- Новокшенов В.Н., Данилова А.Ф., Дешковский В.Н. и др. Некоторые особенности развития техногенной трещиноватости внутри повторно подработанного массива горных пород. *Маркшейдерский вестник*. 2011; 2 (82): 53-55.

- Novokshonov V.N., Danilova A.F., Deshkovsky V.N., et al. Some features of the development of technogenic fracturing inside a recycled rock mass. *The Surveyor's bulletin*. 2011; 2 (82): 53-55. (In Russ.).
12. Кулибаба С.Б. Анализ распределения оседаний земной поверхности в краевой части мульды сдвижения. *Проблемы горного давления*. 2003; 10: 38-47.
Kulibaba S.B. Analysis of the distribution of subsidence of the Earth's surface in the marginal part of the displacement trough. *Problems of mountain pressure*. 2003; 10: 38-47. (In Russ.).
13. Голубев Ф.М., Анциферов В.А., Крижановская Л.Н. К вопросу о влиянии физико-механических параметров подработанного горного массива на характер процесса сдвижения. *Журнал теоретической и прикладной механики*. 2024; 4 (89): 95-103. <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2024-4-95-103>.
Golubev F.M., Antsiferov V.A., Krizhanovskaya L.N. On the question of the influence of the physico-mechanical parameters of a mined mountain range on the nature of the displacement process. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024; 4 (89): 95-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2024-4-95-103>.
14. Быкадоров А.И., Ларичкин П.М., Свирко С.В. Скорость изменения горизонтальных сдвижений подрабатываемой земной поверхности высокомеханизированными забоями шахт Кузбасса. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014; 6 (106): 28-33.
Bykadorov A.I., Larichkin P.M., Svirko S.V. The rate of change of horizontal displacements of the mined earth's surface by highly mechanized mine faces in Kuzbass. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014; 6 (106): 28-33. (In Russ.).
15. Дрибан В.А., Дуброва Н.А. Эволюция деформационных полей многократно подработанного горного массива. *Журнал теоретической и прикладной механики*. 2024; 2 (87): 88-95. <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2024-2-88-95>.
Driban V.A., Dubrova N.A. Evolution of deformation fields of a repeatedly mined mountain range. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024; 2 (87): 88-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2024-2-88-95>.
16. Driban V.A., Dubrova N.A. Evaluation of changes in rock mass permeability due to long-time repeated mining. *Progressive Technologies of coal, coalbed methane and ores mining*. Balkema, Netherlands, 2014: 167-174. (In Russ.).
17. Грищенко Н.Н., Шнеер В.Р., Блиникова Е.В. Особенности мульды сдвижения и зон деформаций в ней при отработке наклонных угольных пластов. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2010; 6: 323-335.
Grishenkov N.N., V.R., Shneer, Blinnikova E.V. Features of the displacement trough and deformation zones in it during mining of inclined coal seams. *Naukov pratsiyu UkrNDMI NAS Ukrainy*. 2010; 6: 323-335. (In Russ.).
18. Грищенко Н.Н. Прогноз деформаций земной поверхности в динамической мульде сдвижения. *Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 24–25 мая 2017 года*. Донецк, 2017; 7: 119-125.
Grishenkov N.N. Forecast of deformations of the Earth's surface in a dynamic displacement zone. *Innovative perspectives of Donbass: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Donetsk, May 24-25, 2017*. Donetsk, 2017; 7: 119-125. (In Russ.).
19. Кожоголов К.С., Таханов Д.К., Кожас А.К. и др. Разработка прогнозных методов расчета оседаний земной поверхности над горными работами. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020; 2: 31-42. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20200204>.
Kozhogulov K.C., Takhanov D.K., Kozhas A.K., et al. Development of predictive methods for calculating subsidence of the Earth's surface over mining operations. *Physico-technical problems of mining*. 2020; 2: 31-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRI20200204>.
20. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки: Утв. Министерством энергетики и электрификации СССР 01.01.1981. Москва, 1981: 142.
Guidelines for determining the coefficient of filtration of aquifers by experimental pumping: Approved by Ministry of Energy and Electrification of the USSR 01.01.1981. Moscow, 1981: 142. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Филипп Максимович Голубев –

канд. техн. наук, заведующий отделом, ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 83004, г. Донецк, Российская Федерация; e-mail: f_golubev@list.ru

Ксения Владимировна Репина –

научный сотрудник, ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 83004, г. Донецк, Российская Федерация; e-mail: ecoseka@rambler.ru

Критерии авторства:

Ф. М. Голубев – постановка задачи исследования, проведение эксперимента, анализ результатов исследования, написание текста статьи; К. В. Репина – проведение эксперимента, выполнение работы по систематизации материала, получение и подготовка данных для анализа, написание текста статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.10.2025

Поступила после рецензирования: 26.11.2025

Принята к публикации: 05.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Filipp M. Golubev –

Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Federal State Budgetary Scientific Institution “Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying”, 83004, Donetsk, Russian Federation; e-mail: f_golubev@list.ru

Ksenia V. Repina –

Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Surveying”, 83004, Donetsk, Russian Federation, e-mail: ecoseka@rambler.ru

Contribution:

F. M. Golubev – Setting the research problem, conducting the experiment, analyzing the research results, writing the text of the article; K. V. Repina – Conducting an experiment, performing work on systematizing the material, obtaining and preparing data for analysis, writing the text of the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 29.10.2025

Revised: 26.11.2025

Accepted: 05.12.2025

Восстановление информации об оседаниях массива налегающей толщи и земной поверхности по результатам измерений на развивающемся полигоне Яковлевского месторождения

В. В. Мусихин¹, Н. А. Анохин^{1✉}, Д. Х. Гилязов²

¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация

² ООО «Яковлевский горно-обогатительный комбинат», пос. Яковлево, Российская Федерация
✉ nikitaanokhin59@gmail.com

Резюме. Приведены результаты исследований по повышению информативности деформационного мониторинга на развивающемся маркшейдерско-геодезическом полигоне (МГП) Яковлевского месторождения. Выявлено, что непостоянство наблюдательной сети, частичная утрата и последующее восстановление реперов приводят к потере критически важной информации о динамике и максимальных значениях оседаний. Представлен подход к решению этой проблемы, основанный на синтезе имеющихся разрозненных данных наблюдений как на поверхности, так и в массиве. Показано, что метод пространственно-временного моделирования позволяет эффективно восстанавливать недостающие данные, реконструировать поле оседаний и характер развития мульды сдвижения во времени. Проведена оценка геомеханической обстановки на месторождении на основе синтезированных данных. Результаты исследований могут быть полезными при объективной геомеханической оценке состояния массива горных пород и для обеспечения безопасной отработки месторождения в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: оседания массива, репер, маркшейдерско-геодезический полигон, наблюдения за оседаниями, поверхность, скорости оседаний, оседания в шахте, мульда оседаний, деформационный мониторинг, нивелирование

Благодарности, признательность, финансирование: Выражаем благодарность научному руководителю работ профессору Юрию Александровичу Кашникову за критические замечания и ценные рекомендации, а также признательность коллегам инженерно-технического персонала управления гидрогеомеханического мониторинга Яковлевского ГОКа за содействие в выполнении мониторинга.

Для цитирования: Мусихин В.В., Анохин Н.А., Гилязов Д.Х. Восстановление информации об оседаниях массива налегающей толщи и земной поверхности по результатам измерений на развивающемся полигоне Яковлевского месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):90-96. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-90-96>.

Reconstruction of subsidence data for the overlying rock mass and ground surface from measurements on an evolving monitoring network at the Yakovlevskoye deposit

V. V. Musikhin¹, N. A. Anokhin^{1✉}, D. Kh. Gilyazev²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Yakovlevsky Mining and Processing Plant LLC, Yakovlevo, Russian Federation
✉ nikitaanokhin59@gmail.com

Abstract. This paper presents the results of a study on enhancing the information value of deformation monitoring at the developing mine surveying and geodetic network of the Yakovlevskoye deposit. It was found that the instability of the observation network, including the partial loss and subsequent restoration of benchmarks, leads to the loss of crucial information on the dynamics and maximum values of subsidence. An approach to solve this problem is presented, based on the synthesis of available disparate observation data from both the surface and the rock mass. It is shown that the spatio-temporal modeling method allows for the effective

reconstruction of missing data, the subsidence field, and the development pattern of the subsidence trough over time. An assessment of the geomechanical situation at the deposit was performed based on the synthesized data. The research findings can be useful for the objective geomechanical assessment of the rock mass state and for ensuring the safe exploitation of the deposit under complex mining and geological conditions.

Keywords: subsidence, benchmark, mine surveying and geodetic polygon, subsidence monitoring, surface, subsidence rates, in-mine subsidence, subsidence trough, deformation monitoring, leveling

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors wish to thank their scientific supervisor, Prof. Yuri A. Kashnikov, for his critical comments and valuable recommendations. They also wish to acknowledge their colleagues from the engineering and technical staff of the Department of Hydro-geomechanical Monitoring at the Yakovlevsky GOK for their assistance in carrying out the monitoring.

For citation: Musikhin V.V., Anokhin N.A., Gilyazev D.Kh. Reconstruction of subsidence data for the overlying rock mass and ground surface from measurements on an evolving monitoring network at the Yakovlevskoye deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):90-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-90-96>.

Введение

Отработка богатых железных руд на Яковлевском месторождении производится подземным способом. В качестве основной на Яковлевском руднике принята нисходящая слоевая система разработки с закладкой. Добыча руды на Яковлевском руднике начата в 2007 году с отработки нулевого слоя на глубине 600 м (отметка -370 м) в шести очистных блоках. Очистные работы системой разработки нисходящими слоями с твердеющей закладкой предусматривают отработку запасов руды с опережением верхними слоями нижних [1].

Из-за пустот, возникающих в результате проектной недо-закладки выработок, усадки закладочного материала и наличия незаложенных пустот в кровле нулевого слоя, возникли оседания массива налегающей толщи и земной поверхности, которые достигли в сентябре 2024 года значения в 3,1 м [2]. В этой связи работы по мониторингу оседаний и сдвижений являются необходимыми как для подземной части месторождения, так и для поверхностной [3, 4].

Маркшейдерско-геодезический полигон на Яковлевском месторождении состоит из поверхностного и подземного полигонов. Целью последнего является мониторинг смещения массива в процессе отработки месторождения. На полигонах с регулярной периодичностью и достаточной точностью выполняются геодезические измерения (нивелирование III класса) с целью определения оседаний [5]. Сеть полигонов постоянно развивается: происходит закладка новых реперов в областях расширяющейся зоны влияния горных работ и закладка взамен утраченных реперов в условиях уже идущих деформационных процессов. Реперы в зависимости от места закладки имеют ограниченный жизненный цикл, который в перспективе будет меньше срока отработки месторождения, поэтому со временем реперы нулевого цикла утрачиваются.

С утратой реперов обычно утрачивается информация о скоростях оседаний, и в конечном счете при оценке текущих оседаний исходят из номенклатуры существующих реперов, несмотря на то, что реперы могли быть заложены в условиях уже идущих деформационных процессов [6]. Эта проблема является характерной для подавляющего большинства наблюдательных станций за сдвижением горных пород, так как старые реперы часто нарушаются, а новые закладываются в местах, где уже прошли определенные оседания [7]. В связи с этим идеей работы является синтез скоростей всех существовавших реперов с учетом их планового положения для картографирования мульды оседаний на любой период, включая текущий, и расчет максимальных значений оседаний.

Цель исследований: восстановление истинных величин оседаний и картографирование мульды оседаний в условиях непостоянной номенклатуры реперов на маркшейдерско-геодезическом полигоне Яковлевского месторождения, а также максимальное использование имеющейся информации каждого утраченного и существующего реперов.

Методика исследований

Для анализа были собраны и систематизированы все архивные и текущие данные нивелирования по реперам маркшейдерско-геодезического полигона Яковлевского месторождения.

Для каждого репера, включая утраченные, были рассчитаны средние скорости оседаний за весь период его функционирования.

На основе полученного массива данных о скоростях и плановом положении реперов выполнялась пространственная интерполяция для построения карт мульды оседаний и определения полных накопленных смещений.

Объект исследования: Яковлевское железорудное месторождение.

Предмет исследования: база данных наблюдений МГП на поверхности и в массиве за весь период существования.

Результаты исследований

Текущее состояние маркшейдерско-геодезического полигона на поверхности

База результатов мониторинга маркшейдерско-геодезического полигона на поверхности ЯГОК содержит данные с 2010 года. Дата 01.01.2010 является нулевым циклом и фактически считается началом известных деформационных процессов на поверхности. К текущему моменту имеются результаты 35 серий наблюдений, включающих от одной (2018 г.) до пяти (2014 г.) серий в год, в среднем две серии наблюдений в год.

До данного исследования оценка максимальных оседаний и наклонов каждый цикл основывалась на ограниченном и уменьшающемся перечне реперов, заложенных до 2013 года. [8]. В процессе обустройства территории поверхностных закладочных комплексов и связанного с этим строительства отдельные реперы уничтожаются. К концу 2024 года из 51 репера, заложенного до 2013 года, остался только 41. Среди уничтоженных реперов большая часть находилась в зоне максимальных оседаний, включая репер Rp7 с максимальными накопленными оседаниями к 2023 году.

В связи с этой тенденцией потеря информации о мак-

симальных оседаниях с использованием только реперов до 2013 года с течением времени становилась неизбежной. Кроме того, в условиях ограниченной, разряженной и нерегулярной сети реперов с течением времени картографирование накопленной мульды оседаний становится фрагментарным.

Летом 2023 года в результате реконструкции геополигона было заложено 129 реперов забивного типа (рис. 1) (см. цв. вклейку на стр. 97), которые включены в работу [9]. Однако данные реперы совместно с уже имеющимися позволяли оценивать только современные скорости оседаний и накопленные оседания с 2023 года. В итоге из 244 заложенных реперов с 2010 года в работе для оценки накопленных оседаний использовался 41 репер, а для текущих задач – 219. За все время были утрачены 25 реперов, их скорости не учитывались для последних циклов мониторинга. Сведения о максимальных оседаниях на Rp7 экстраполировались во времени с учетом скоростей за последние четыре цикла.

Моделирование мульды оседаний за весь период наблюдений и пересчет унаследованных оседаний для новых реперов поверхностной наблюдательной станции

Моделирование мульды оседаний за весь период наблюдений и пересчет унаследованных оседаний для новых реперов подразумевает использование всех существовавших и существующих реперов для картографирования мульды оседаний на все серии наблюдений, включая последнюю с начала наблюдений на первых реперах 2010 года.

Моделирование начиналось с построения карты оседаний для реперов первого поколения, заложенных перед первыми наблюдениями 2010 года, на дату закладки реперов второго поколения – 05.2012. Для реперов первого поколения (первой серии) было принято условие, что до 2010 года деформационные процессы отсутствовали. Придание реперам нулевого цикла ненулевых значений оседаний требуют ретроспективного или геомеханического моделирования, что является отдельным научным вопросом [10, 11]. Учитывая также тот факт, что добыча руды на Яковлевском руднике начата в 2007 году, а временной лаг сдвижений, возникающих на поверхности от начала отработки пространства в шахте, занимает три года, то предполагается, что первые деформационные процессы начали возникать в 2010 году. И с учетом незначительных скоростей оседаний первого цикла они не могли достигнуть значимых по сравнению с последующими скоростями значений [2].

Пересчет унаследованных значений оседаний для реперов производился следующим образом. Реперы имеющейся базы данных были ранжированы по дате закладки (по поколению). Всего получилось 16 поколений реперов и соответствующих серий, в которые включались введенные реперы. По реперам первого поколения была построена площадная карта оседаний (грид, с размером ячейки 10 м) методом кубической интерполяции Клафа – Точера в ГИС QGIS [12].

На полученную карту наносились реперы второго поколения. В ячейках грида, занимаемых соответствующими реперами второго поколения, снимались интерполированные значения оседаний. Реперам второго поколения вместо исходного нулевого значения придавалось снятое в соответствующей ячейке грида значение интерполированного оседания. Такие оседания являются унаследованными от реперов предыдущего поколения. Никакие поправки в последующие

оседания, полученные измерениями, далее не вносились (за исключением поправок за повреждения реперов).

При построении карт оседаний помимо участия в построении реперов предыдущего поколения выносились также краевые условные реперы с нулевыми оседаниями в пределах прямоугольника, вписывающего реперы текущего поколения. Это было необходимо для расширения мульды оседаний в пределах существующего прямоугольного контура реперов и экстраполяции оседаний в краевых частях контуров положения реперов, так как новые реперы часто закладывались снаружи описываемого реперами многоугольного контура.

Далее, по реперам первого и второго поколения строилась карта оседаний на дату закладки третьего поколения реперов. Определялись унаследованные значения оседаний для реперов третьего поколения и т. д. Всего было построено 15 карт оседаний.

Таким образом, для реперов 15-го поколения, заложенных в 2023 году в количестве 129 штук, стали доступны начальные оседания (рис. 2) (см. цв. вклейку на стр. 97) со значениями от 0 до 2 709 мм (Rp200). Максимальные значения оседаний репера Rp7, фиксируемые до его уничтожения в 2023 году, как и значения оседаний остальных утраченных реперов, просуществовавших минимум один цикл (две серии), были учтены при построении соответствующих карт накопленных оседаний и сложили в итоге рисунок текущей карты накопленных оседаний.

Правильность проведенного пересчета оседаний подтверждается характерами графиков оседаний во времени, теперь большинство графиков ретроспективно экстраполируются в одну начальную точку (прим. 2010 г., рис. 3) (см. цв. вклейку на стр. 98), а также характером профилей мульды оседаний, которые приняли классический вид распределения (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 98). Максимальное значение оседаний к текущей дате наблюдений составило значение 3 393 мм (для Rp70).

Текущее состояние наблюдательной станции за сдвижением массива пород предохранительного целика

Для обеспечения безопасности отработки запасов Яковлевского месторождения под неосушенными горизонтами был оставлен целик богатых железных руд (БЖР, рудная потолочина). Научными исследованиями обоснована возможность отработки на первоочередном участке месторождения одного этажа без предварительного осушения нижнекаменноугольного горизонта. Для этого между зоной ведения очистных работ и водоносным горизонтом был оставлен предохранительный рудный целик мощностью 65 м [13].

В качестве рабочих реперов для мониторинга сдвижений массива целика в шахте используется конструкция, разработанная на Яковлевском руднике, представляющая собой металлический отвес-цилиндр, соединенный тросом с якорем, углубленным в 8-метровую скважину в массив. Реперы в кровле выработок должны размещаться через 30–50 м. При закладке выработки репер перевязывается на новый трос с длиной, достаточной для его выхода на нижний уровень. Новый трос с репером укладывается в вертикальную трубу для защиты от закладочного материала. После отработки нижнего горизонта репер освобождается и продолжает использоваться для наблюдений [14].

База данных результатов мониторинга сдвижений мас-

сива целика в шахте ЯГОК содержит данные с 2007 года. К текущей серии наблюдений имеются результаты 80 серий наблюдений, включающих от одной (2014 г.) до десяти (2008 г.) серий в год, в среднем четыре серии наблюдений в год.

Проблема сохранности реперов в шахте стоит острее, чем на поверхности. Постоянное движение работ по закладке выработок и крепежных работ часто приводит к несогласованной консервации рабочих реперов без мер по их сохранности и, как следствие, к их утрате. В этой связи за все время мониторинга наблюдательный подземный полигон стал представлять собой меняющуюся нерегулярную сеть реперов, в которой почти все современные реперы были заложены намного позже начальной серии, а утраченные существовали всего несколько циклов и были размещены в разных местах по довольно разреженной сетке (рис. 5). Плотность наблюдений в этом случае сильно уступает плотности и полноте наблюдений на поверхности, она недостаточная для определения накопленных оседаний без использования дополнительного моделирования.

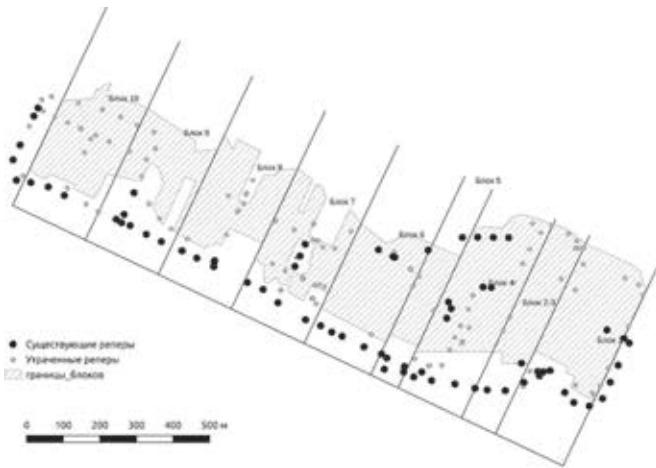


Рис. 5. Современное состояние наблюдательной станции в шахте /
Fig. 5. Current status of the underground monitoring station

Моделирование мульды оседаний за весь период наблюдений для подземной наблюдательной станции при помощи пространственной интерполяции

Моделирование мульды оседаний за весь период наблюдений подразумевает использование всех существовавших и существующих реперов для картографирования мульды оседаний на все года, включая последнюю дату с начала наблюдений на первых реперах 2007 года. Отличие подземного полигона от поверхностного заключается в том, что закладка новых реперов и утрата старых (особенно последнее время) здесь происходят практически перед каждой серией. Поэтому подход к синтезу данных несколько отличался от моделирования на поверхности.

В качестве подготовительных работ перед моделированием база данных анализировалась на выбросы. Так, в процессе эксплуатации возможен повторный монтаж репера, что приводит к скачкообразному изменению высотных отметок. Данные выбросы устранялись введением поправок с учетом тенденций оседаний. Кроме того, для многих реперов существуют окна наблюдений, когда репер не имеет высотной отметки на одном из прошедших циклов наблюдений, а потом вновь включается в работу. В этом случае оседания в окнах заполнялись интерполяцией по времени.

Далее для моделирования делались ежегодные выборки реперов начиная с первой даты наблюдений. Каждая выборка содержала набор реперов, имеющих минимум две серии наблюдений в году с последней даты предшествующего года до последней даты выбираемого. Так как каждый репер чаще имел более одного цикла измерений в году, для репера вычислялись средневзвешенные скорости, где в качестве веса выступал интервал отдельного цикла. Средневзвешенные значения скоростей множились на интервал исследуемого года с последней даты предшествующего года до последней даты выбираемого. Таким образом выборки каждого года содержали средневзвешенные значения накопленных оседаний по всем реперам, участвовавшим в наблюдениях исследуемого года.

Для каждой выборки добавлялись 45 условных краевых реперов с нулевыми значениями оседаний, расположенных на расстоянии 20–30 м от границы отработки для задания краевых ограничений массива.

По каждой выборке строились карты накопленных оседаний (грид, с размером ячейки 10 м) методом линейной интерполяции [15]. Всего было построено 19 карт оседаний с одинаковыми параметрами с 2007 года по текущую дату: 2025 год.

На основе полученных карт в точках с бывшими и существующими реперами снимались интерполированные в пространстве значения оседаний. Максимальное накопленное (суммарное) значение оседаний за все годы составило 2 860 мм, что было ниже, согласно ранее выполненным оценкам по скоростям отдельных реперов значению 3 970 мм. Таким образом, строгое пространственное интерполирование имеющихся реперов показало заниженное суммарное значение оседаний массива. Это говорит о нарушении временного наследования реперами ввиду недостаточно плотной сети мониторинга и разрывов в наблюдениях как в пространстве, так и во времени.

Восстановление тренда оседаний реперов

Пространственная интерполяция позволила получить хоть и заниженные, но не нулевые интерполированные значения для реперов, на которых отсутствуют результаты измерений. На графике (рис. 6) (см. цв. вклейку на стр. 99) показано временное смещение точки в зоне максимальных оседаний репера Rp4-3-19, существовавшего с весны 2024 года оседания, в зоне которого на первом этапе были определены пространственной интерполяцией от соседних реперов.

Но в интервале с 2015 по 2020 год в данной зоне по причине отсутствия рабочих реперов даже интерполированных оседаний почти не было выявлено. В дальнейшем данные подверглись интерполяции во времени.

Идея интерполяции во времени заключалась в замене интервалов с заниженными значениями скоростей оседаний интервалами средних предшествующих интервалу скоростей (за год и более). Для каждой точки рассчитывалась среднегодовая скорость на основе суммарного накопленного значения оседаний за 19 лет. Далее принималось условие: если измеренная скорость в отдельном году ниже порогового отношения от среднегодовой за 19 лет, то такая скорость заменялась средней скоростью предыдущего интервала за четыре предшествующих года (2, 3). Пороговое отношение (коэффициент k_{th}) выбиралось в интервале от 0 до 10.

На рисунке 6 показаны примеры с использованием коэффициента 0,1 (2–5 значения), 0,3, 0,5, 0,9 и 1,5.

Поскольку оседания моделировались в первом случае как тренд скоростей за последние четыре года, к первым четырем годам описанные условия не применялись.

$$k_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta h} \quad (1)$$

$$s_{(i+4;...)} = \Delta h_{(i+4;...)}, k_{(i+4;...)} > 0,5. \quad (2)$$

$$s_{(i+4;...)} = \Delta h_{i;i+3}, k_{(i+4;...)} \leq 0,5, \quad (3)$$

где k_i – коэффициент отношения к среднегодовой скорости оседаний;

Δh_i – оседания отдельного годового интервала, мм;

Δh – среднегодовая скорость на основе суммарного накопленного значения оседаний за 19 лет, мм/год;

$s_{(i+4;...)}$ – восстановленное оседание годового интервала, мм;

$\Delta h_{i;i+3}$ – среднее оседание за предыдущие четыре годовых интервала, мм.

Вопрос выбора порогового коэффициента k_{th} исходил из максимально полученных значений (рис. 7) и минимальной среднеквадратичной ошибки отклонения от линейного тренда.

На рисунке 7 показаны значения максимальных оседаний в зависимости от выбранного коэффициента порогового отношения. Установлено, что ближайшее к ожидаемому максимальное значение оседаний (3 986 мм) было получено при коэффициентах 0,5–0,7. Для коэффициента больше 1,0 влияние коротких интенсивных оседаний во времени могло привести к завышению накопленных оседаний в итоге расчета, поэтому коэффициент должен был быть меньше 1,0.

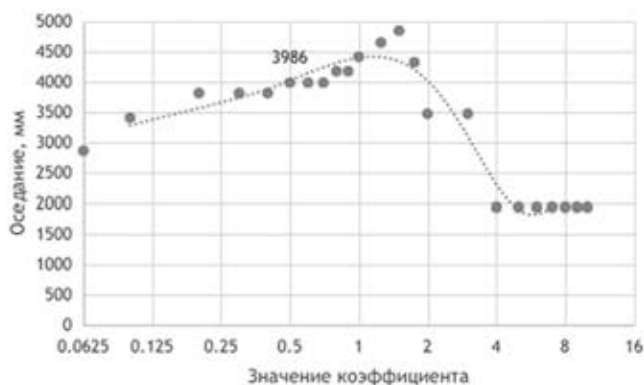


Рис. 7. Значения максимальных оседаний в зависимости от выбранного порогового отношения к среднегодовой скорости оседаний /
Fig. 7. Maximum subsidence values versus the selected threshold coefficient relative to the average annual subsidence rate

Оценка точности основывалась на определении среднеквадратичного отклонения скоростей каждого года от средней за 19 лет. Гистограмма распределения отклонений при коэффициенте 0,5 имела следующие параметры: среднее значение равнялось 1,6 мм, медиана – 1,6 мм, асимметрия – -0,48, эксцесс – 4,1. В плане максимальное среднеквадратичное отклонение было сконцентрировано в репере Rp6-1-4н.

График его оседаний во времени представлен на рисунке 8 (см. цв. вклейку на стр. 99).

Из графика видно, что наблюдения на репере начались в 2019 году. В интервале с середины 2019 года по конец 2020-го по результатам трех серий измерений наблюдались значительные по отношению к последующим скорости оседаний. Данное явление нельзя отнести к грубым ошибкам, так как характер графика не подтверждает ни усадку репера (скорости возросли не с самого начала), ни его закрепление (увеличение скорости подтверждается тремя измерениями), к тому же аналогичное увеличение скоростей по результатам измерений произошло на репере Rp6-1-5н, находящемся в 60 метрах к юго-востоку.

На графике (рис. 8) показаны измеренные значения оседаний репера с 2019 года, смоделированные оседания путем пространственной интерполяции до его закладки (интерполированные), и смоделированные оседания с учетом восстановленного тренда при разных пороговых коэффициентах. Из графика рисунка 8 видно, что коэффициент 0,93 приводит к завышению оседаний выше измеренных после скачка оседаний в 2019–2020 годах. При коэффициенте 0,5 такого не произошло.

Из графика (рис. 8) делается еще один вывод о том, что предложенный метод моделирования оседаний в пространстве, а затем во времени позволил получить для реперов не только восстановленные оседания после окончания их работы, но и до их закладки. То есть, как в случае с моделированием оседаний на поверхности, удалось получить обоснованные унаследованные оседания.

На рисунке 9 представлена полученная карта оседаний с коэффициентом порогового отношения к среднегодовой скорости оседаний 0,5.

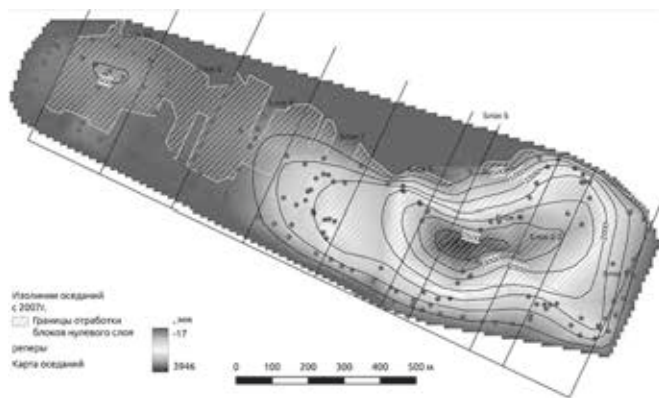


Рис. 9. Карта накопленных оседаний массива целика с $k_{th} = 0,5$ /
Fig. 9. Map of cumulative subsidence of the pillar rock mass with $k_{th} = 0,5$

В моделировании использованы только результаты инструментальных измерений.

Заключение

В работе решен вопрос определения максимальных оседаний на поверхности и в массиве Яковлевского рудника в условиях меняющейся номенклатуры реперов, при которой простое суммирование результатов мониторинга приводило к утрате данных о максимальных оседаниях, неверной оценке развития мульды, а в шахте – к полной невозможности прямого суммирования из-за утраты реперов нулевого цикла.

Применены разные подходы к восстановлению оседаний: на поверхности, где информация была утрачена частично, строились последовательные карты оседаний на каждую дату закладки новых реперов; в шахте, где ин-

формация утрачена полностью и сеть реперов менее равномерна, производилась пространственно-временная интерполяция оседаний с учетом унаследованных значений для каждого репера.

В результате работы получены обоснованные значения максимальных оседаний и построена карта развития мульды на все отдельные даты наблюдений как на поверхности, так и в массиве.

Установлено, что на поверхности восстановленные значения оседаний оказались выше измеренных, так как в расчет включились новые реперы с унаследованными (интерполированными) оседаниями от ранее существовавших. В шахте получено обоснованное значение оседаний, превышающее значение на поверхности на 17 %.

Использование принципа расчетного пространственного и временного унаследования оседаний новыми реперами позволяет максимально извлекать информацию даже с реперов, просуществовавших один цикл, и учитывать вклад каждого существовавшего репера при анализе современного состояния деформационных процессов.

Полученные в работе значения рекомендуется включить

в дальнейшие результаты мониторинга для обеспечения объективной геомеханической оценки.

При дальнейшей эксплуатации наблюдательной сети на поверхности и в шахте при закладке новых реперов рекомендуется применять принцип наследования оседаний.

Для корректного временного моделирования оседаний в местах утраченных реперов следует исходить из условия, описанного в данной работе, что уменьшение скоростей в измеряемом интервале не может быть меньше 50 % от средних скоростей за все время наблюдений.

Выводы

1. Статья посвящена исследованию восстановления истинных величин оседаний и картографированию мульды оседаний в условиях непостоянной номенклатуры реперов на маркшейдерско-геодезическом полигоне Яковлевского месторождения.

2. Результаты исследований могут быть полезными при объективной геомеханической оценке состояния массива горных пород и для обеспечения безопасной отработки месторождения в сложных горно-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. Геомеханическое обоснование разработки Яковлевского месторождения под неосушенными водоносными горизонтами. *ГИАБ*. 2013; 4: 27-37
Grigoryev A.M., Zoteev O.V., Makarov A.B. Geomechanical substantiation for the development of the Yakovlevskoye deposit under undrained aquifers. *GIAB*. 2013; 4: 27-37. (In Russ.).
2. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Голубничий Д.В. и др. Деформационные процессы массива горных пород при отработке Яковлевского месторождения. *Горный журнал*. 2025; 10: 28-34. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.10.04>
Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Golubnichiy D.V., et al. Deformation processes in the rock mass during the mining of the Yakovlevskoye deposit. *Mining magazin*. 2025; 10: 28-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.10.04>.
3. Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Дашко Р.Э. Гидрогеологический мониторинг на Яковлевском руднике как инструмент повышения безопасности ведения очистных работ в сложных горно-геологических условиях. *Записки горного института*. 2010; 185: 123-127
Trushko V.L., Protosenya A.G., Dashko R.E. Hydrogeological monitoring at the Yakovlevskoye mine as a tool for improving the safety of mining operations in complex mining and geological conditions. *notes of the Mining Institute*. 2010; 185: 123-127. (In Russ.).
4. Hejmanowski R. Time-space ground subsidence prediction by volume extraction from the rock mass. *Paper presented at 6th International Symposium on Land Subsidence*, 2: 24–29 September; Ravenna. 2000; 2: 29-41.
5. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. ГКИНП (ГНТА) – 03-010-03. Москва, 2004.
Instruction on I, II, III, IV class leveling. GKINP (GNTA) - 03-010-03. Moscow, 2004. (In Russ.).
6. Инструкция по наблюдениям за движением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / Министерство цветных металлов СССР. Горное управление. Введена 03.07.86. Разработана ВНИМИ, ВНИПИгорцветмет. Москва, 1988: 112 с.
Instruction on monitoring rock and surface movement during underground mining of ore deposits. Moscow, 1988: 112. (In Russ.).
7. Кашников Ю.А., Беляев К.В., Богданец Е.С. и др. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа. 1-е изд. Москва, 2018: 454.
Kashnikov Yu.A., Belyaev K.V., Bogdanets E.S., et al. Mine surveying support for the development of oil and gas fields. Moscow, 2018: 454. (In Russ.).
8. Тютюкова В.А., Голубничий Д.В., Гилязов Д.Х. Определение оседаний земной поверхности по результатам совместной интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 2 (124): 69-75. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_69_75
Tyutyukova V.A., Golubnichiy D.V., Gilyazev D.Kh. Determination of land subsidence from the results of joint interferometric processing of Sentinel-1a and Sentinel-1b satellite radar sounding data. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023; 2 (124): 69-75. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_69_75.
9. Анохин Н.А. Анализ влияния плотности заложения реперов наблюдательной станции Яковлевского рудника богатых железных руд на параметры сдвижений земной поверхности. *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: Материалы конференции*. Пермь, 2024; 1: 150-153.
Anokhin N.A. Analysis of the influence of benchmark network density at the Yakovlevskoye iron ore mine observation station on surface movement parameters. *Materials of the conference "Problems of developing hydrocarbon and ore mineral deposits"*. Perm, 2024; 1: 150-153. (In Russ.).
10. Ktratzsch G. Bergschadekunde. Papierflieger Verlag GmbH. 2005; 894.
11. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Шустов Д.В. Комплексные геомеханические проблемы при освоении недр. *Горный журнал*. 2025; 3: 11-18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.02>
Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Shustov D.V. Complex geomechanical problems in subsurface resource development. *Mining magazin*. 2025; 3: 11-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.02>.

12. Учебное пособие QGIS: электронная версия. URL: <https://docs.qgis.org/3.34/ru/docs/index.html#>
QGIS training manual, electronic version. URL: <https://docs.qgis.org/3.34/ru/docs/index.html#> (In Russ.).
13. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. и др. Разработка Яковлевского месторождения под водоносными горизонтами системой с закладкой. Развитие идей Д. М. Бронникова в области разработки рудных месторождений на больших глубинах. Под ред. акад. К. Н. Трубецкого Москва, 2013: 84-96.
Grigoryev A.M., Zoteev O.V., Makarov A.B., et al. Development of the Yakovlevskoye deposit under aquifers using a system with backfilling. Development of D.M. Bronnikov's ideas in the field of deep ore deposit mining. Moscow, 2013: 84-96.
14. Регламент гидрогеомеханического мониторинга отработки запасов богатых железных руд Яковлевского месторождения. Екатеринбург, 2020.
Regulations for hydro-geomechanical monitoring of the mining of rich iron ore reserves at the Yakovlevskoye deposit. Ekaterinburg, 2020. (In Russ.).
15. Катаев А.В. Цифровое моделирование топографических поверхностей. Пермь, 2024: 383 с.
Kataev A.V. Digital modeling of topographic surfaces. Perm, 2024: 383. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Василий Владимирович Мусихин –

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: basil2@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3038-2241>

Никита Анатольевич Анохин –

аспирант, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: nikitaanokhin59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-8855-2588>

Денис Хайдарович Гилязов –

начальник службы гидрогеомеханического мониторинга ООО «Яковлевский ГОК», 309070, пос. Яковлево, Российская Федерация, e-mail: dkh.gilyazev@severstal.com

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: 19.11.2025

Поступила после рецензирования: 30.11.2025

Принята к публикации: 02.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Vasily V. Musikhin –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: basil2@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3038-2241>

Nikita A. Anokhin –

PhD student, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: nikitaanokhin59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-8855-2588>

Denis Kh. Gilyazev –

Head of the Hydrogeomechanical Monitoring Service, Yakovlevsky Mining and Processing Plant LLC, 309070, Yakovlevo, Russian Federation; e-mail: dkh.gilyazev@severstal.com

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.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 19.11.2025

Revised: 30.11.2025

Accepted: 02.12.2025

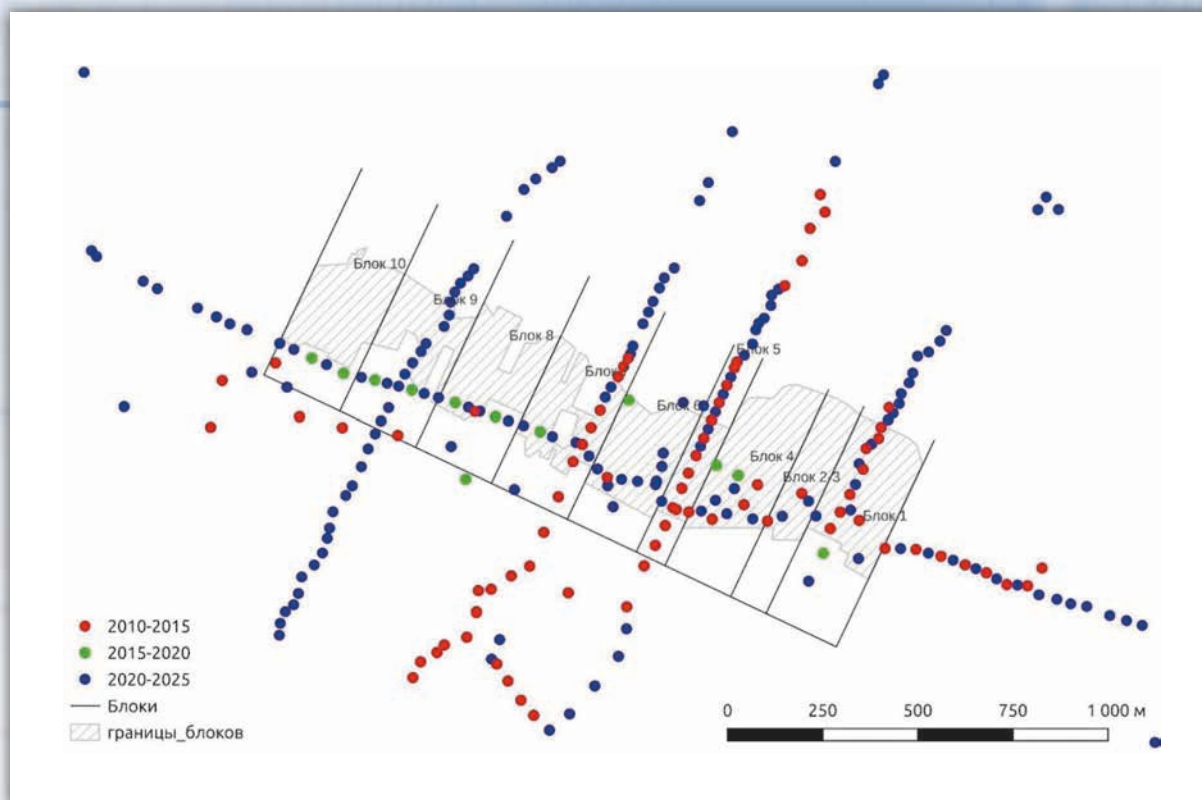


Рис. 1. Даты закладки реперов на карте поверхностного полигона /
 Fig. 1. Map of the surface monitoring network showing benchmark installation dates

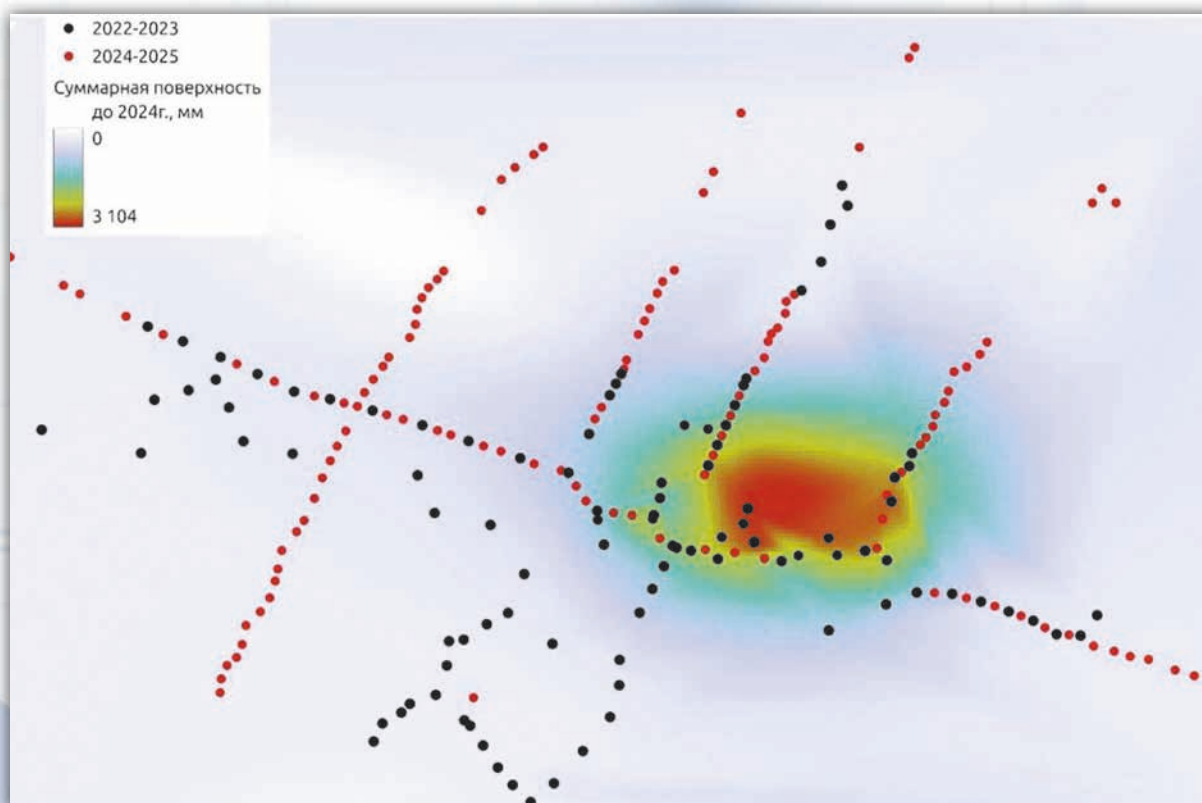


Рис. 2. Моделирование унаследованных оседаний для реперов 15-го (предпоследнего) поколения (красные точки) на основе карты, построенной по данным реперов 14-го поколения (черные точки) /
 Fig. 2. Modeling of inherited subsidence for the 15th (penultimate) generation benchmarks (red dots) based on the map constructed from 14th generation benchmark data (black dots)

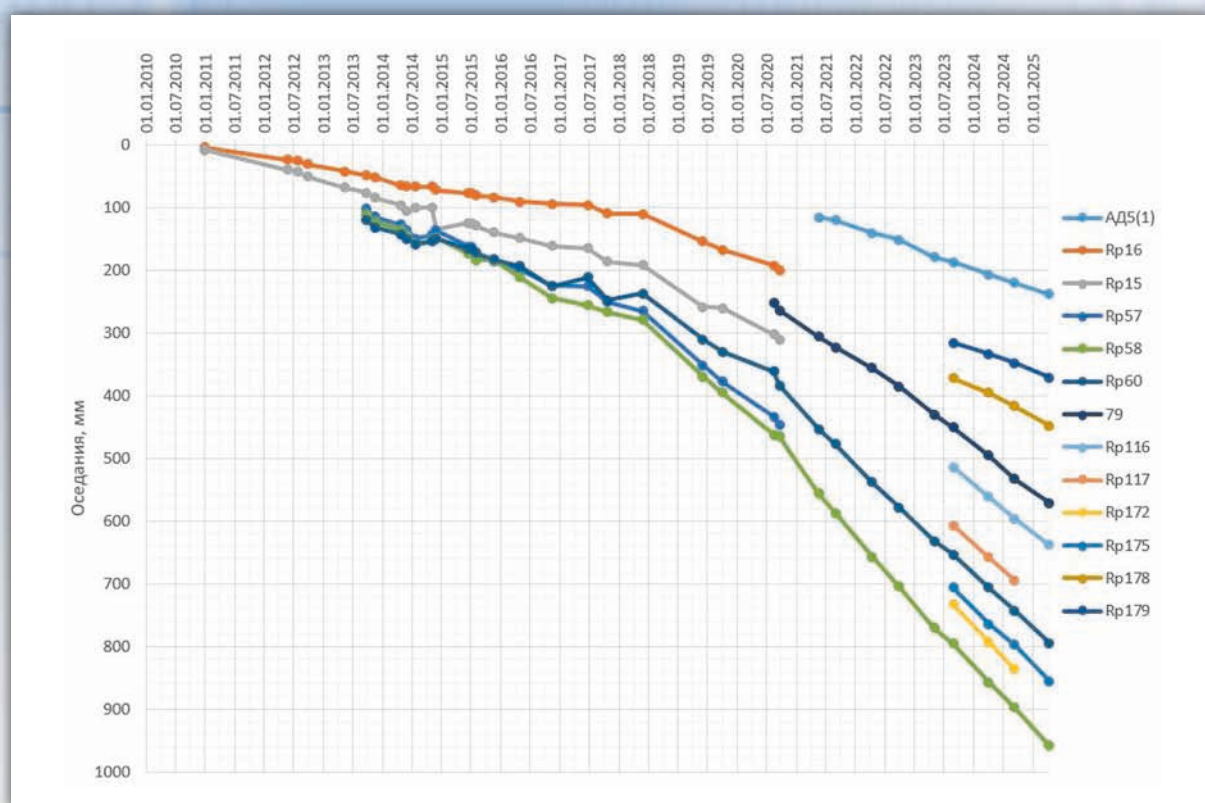


Рис. 3. Значения оседаний реперов в пределах границ блока 7 /
Fig. 3. Benchmark subsidence values within the boundaries of Block 7

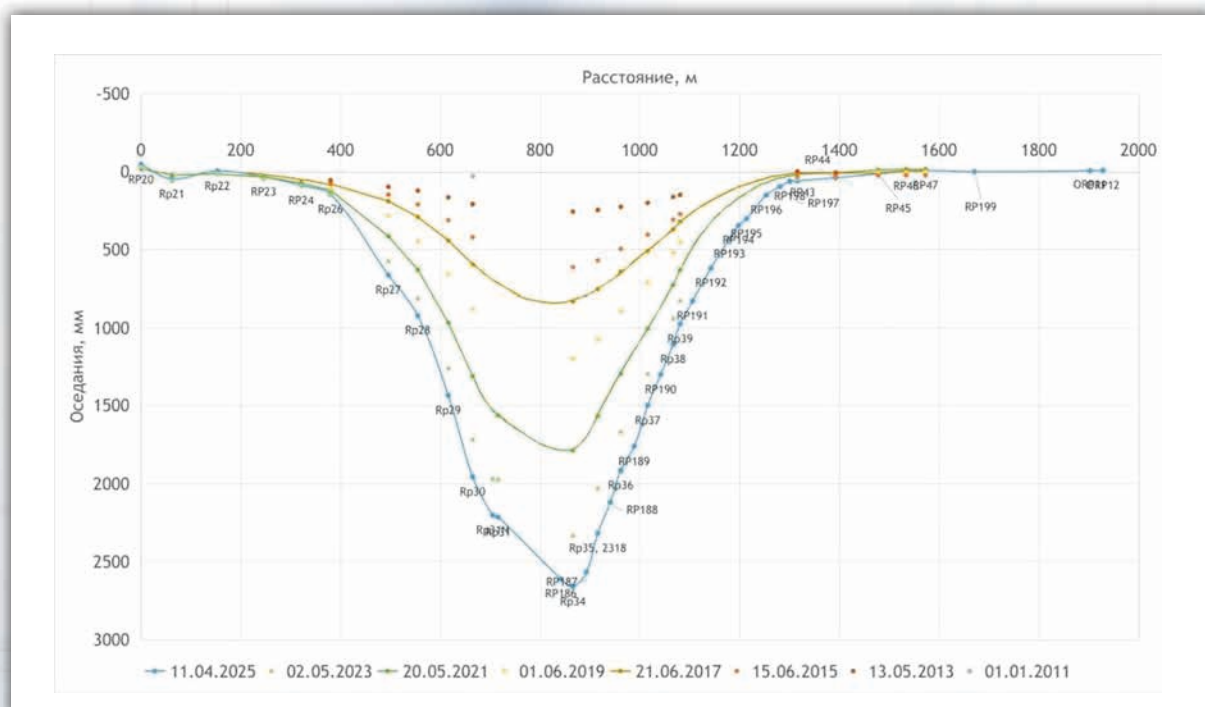


Рис. 4. Профиль оседаний вкрест простирания II-II по блоку 5 /
Fig. 4. Cross-strike subsidence profile II-II through Block 5

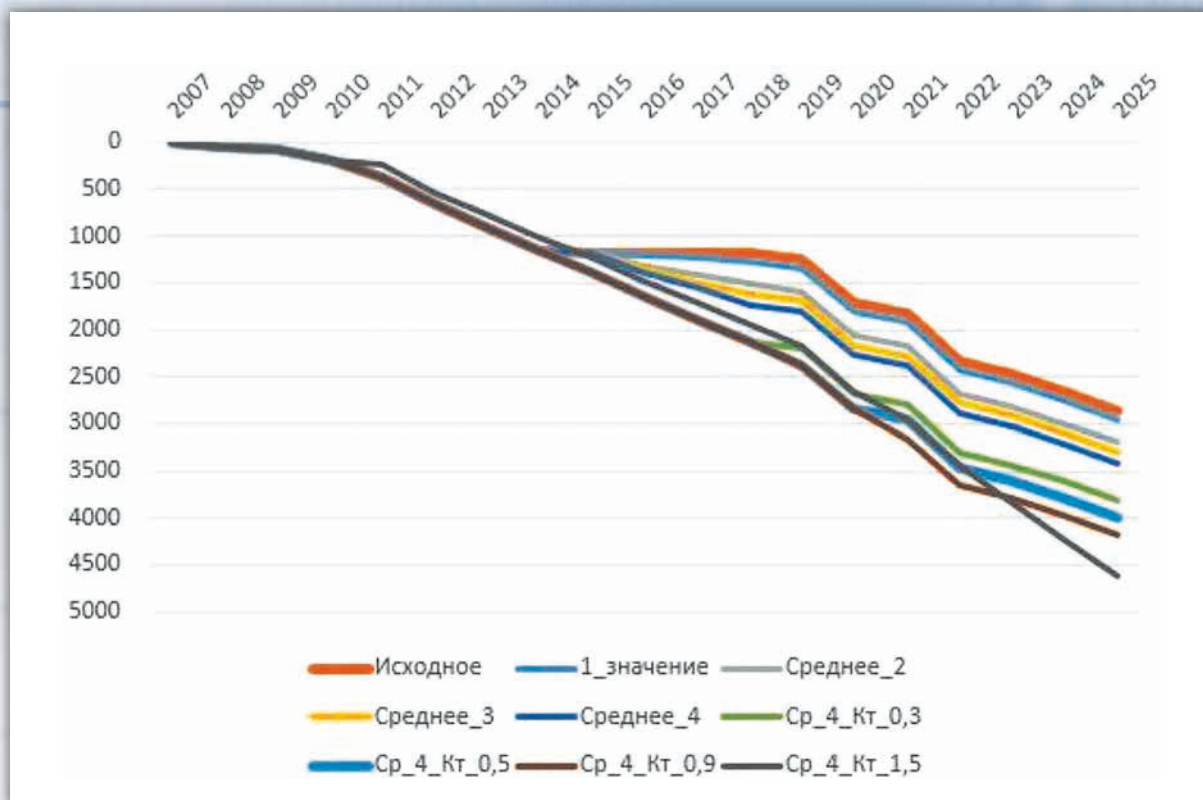


Рис. 6. Временное смещение точки в зоне максимальных оседаний /
Fig. 6. Displacement over time of a point in the maximum subsidence zone

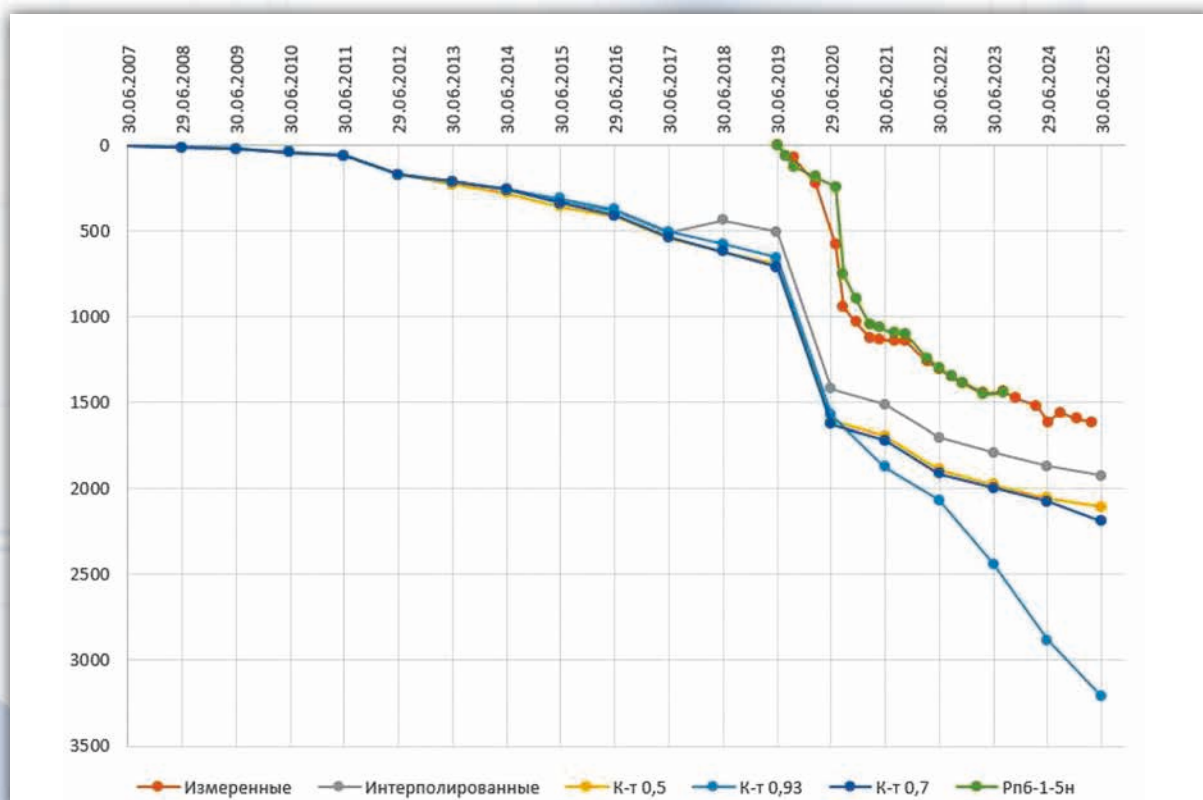


Рис. 8. Графики оседаний во времени точки у репера Рр6-1-4н /
Fig. 8. Time-subsidence plot for the point near benchmark Rp6-1-4n

XI Международная специализированная выставка

НЕДРА **РОССИИ**

XXXIV Международная специализированная
выставка технологий горных разработок

УГОЛЬ и МАЙНИНГ **РОССИИ**

XVI Международная специализированная выставка

ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

VIII Специализированная выставка

ПРОМТЕХЭКСПО

2-5 июня
2026



Организатор:
Выставочный комплекс «Кузбасская ярмарка»,
ул. Автотранспортная, 51, г. Новокузнецк,
т: 8 (800) 500-40-42

ШИРЕ, ЧЕМ КУЗБАСС!
ГЛУБЖЕ, ЧЕМ УГОЛЬ!

12+

NEDRA 4.0

ИННОВАЦИИ, БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ

16–17 февраля 2026 | Санкт-Петербург

КОНГРЕСС ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

130+

КОМПАНИЙ

300+

УЧАСТНИКОВ

35+

ДОКЛАДЧИКОВ

40+

СТЕНДОВ

100+

VIP-ВСТРЕЧ

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ ПРОГРАММЫ:

- Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли
- Отечественные IT-решения и оборудование для добычи и переработки
- Цифровизация процессов добычи и обогащения
- Промышленная безопасность и защита данных
- Современные подходы для анализа данных в промышленности

0+



+ 7 495 198 63 40
nedra4@sbproekt.ru

ПРИМИТЕ УЧАСТИЕ В ГЛАВНОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ СОБЫТИИ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ!



Mining Week
KAZAKHSTAN, 2026

**XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР**



**23-25
06/2026**

КАРАГАНДА, КАЗАХСТАН

INT EXPO
TOO «TNTEXPO»

tel:
+7 (727) 344 00 63

e-mail:
mintek@intexpo.kz

inst:
mining.week.kazakhstan

