

0+

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

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 26, № 2, МАРТ – АПРЕЛЬ 2026 г.

Vol. 26, № 2, MARCH – APRIL 2026

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

www.n-gn.ru

ГЕОМЕХАНИКА, GEOMECHANICS,
РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД
ROCK DESTRUCTION

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА
И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
MINE AEROGAS DYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ
И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ГОРНЫХ РАБОТ

SURVEYING AND GEOLOGICAL
SUPPORT
FOR MINING WORKS

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ,
ГОРНЫЕ МАШИНЫ

GEOTECHNOLOGY,
MINING MACHINES



СТАЛКЕР 15-24, 80-24

КОМПЛЕКСЫ
ТРАССОПОИСКОВЫЕ

Гарантия
24 месяца

Локализация и диагностика подземных коммуникаций

ПРИЕМНИК ПТ-24:

ФУНКЦИЯ «КОМПАС» С РЕЖИМОМ «ВТОРАЯ ЛИНИЯ»

Одновременное схематическое отображение на дисплее искомым коммуникации и трассы с протекающим током 50, 100 или 300 Гц.



- GPS-выноска подземных трасс с последующим наложением на карту;
- высокоточное позиционирование (до 1 см) совместно с RTK-планшетом PrinCe LT700H;
- использование смартфона вместо внешнего GPS-трекера;
- встроенный GPS/ГЛОНАСС-модуль;
- время работы – до 20 ч.



RTK-планшет
PrinCe LT700H

ГЕНЕРАТОР ГТ-15:

НОВЫЙ

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



ГЕНЕРАТОР ГТ-80:

НОВЫЙ

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



РАДИО-СЕРВИС



426000, г. Ижевск, м/л 10047, ул. Пушкарская, 268, тел.: (3412) 43-81-44, факс: (3412) 43-82-83, e-mail: office@radio-service.ru, www.radio-service.ru

0+



На проект рекламы

Научно-внедренческая компания ГОРГЕОМЕХ



- МАРКШЕЙДЕРСКИЕ РАБОТЫ
- ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
- ГЕОМОНИТОРИНГ
- ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ
- ОБСЛЕДОВАНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СООРУЖЕНИЙ
- ГОРНЫЙ АУДИТ
- НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ
- РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ
- ПРОЧИЕ РАБОТЫ

ООО Научно-внедренческая компания «Горная геомеханика»
Москва, Варшавское ш., д.129 кор.2
+7 495 315 17 38
Info@gorgeomeh.ru
www.gorgeomeh.ru



Более 12 - ти лет
на ниве геомеханики

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Научно-технический и производственный журнал



Т. 26, № 2

МАРТ – АПРЕЛЬ 2026 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
ВИНИТИ и в Российский индекс научного цитирования.
Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной
справочной системе по периодическим и продолжающимся
изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Подписной индекс издания в каталоге «Урал-Пресс»,
в объединенном каталоге АРЗИ «Пресса России» – **88016**

В течение года можно произвести подписку на журнал
непосредственно в редакции

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

При перепечатке ссылка на журнал
«Маркшейдерия и недропользование» обязательна

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

Тираж 1000 экз.

Свободная цена.

Дата выхода в свет: 28.04.2026

ISSN 2079-3332



24 003



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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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 Сагинуова, г. Караганда, Республика Казахстан

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

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

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

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

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Scientific, Technological and Production Journal



Vol. 26, № 2
MARCH – APRIL 2026

journal has been published since 2001



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

EDITORIAL OFFICE:

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

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE AND PUBLISHER:

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

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

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

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

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

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

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

When reprinting a link to the journal
«Mine Surveying and Subsurface Use» required
Printed by LLC «Printing Club»

127018, Moscow
phone: +7(929)982-72-82
Covering - 1000 copies.
Free price.
Release date: 28.04.2026

ISSN 2079-3332



24 003



9 772079 333778



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

EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

Alexander A. Baryakh - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the scientific direction Mining Sciences of the center, Mining Institute, Ural Branch, RAS, Perm, Russian Federation
Vladimir I. Golik - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Mining Department, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation
Victor V. Gritskov - Vice-President of the Union of Surveyors of Russia, Moscow, Russian Federation
Valery N. Zakharov - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
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. Khreshchok - 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

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ

- В. В. Арно, Е. П. Колесниченко, И. Ю. Гарифулина,
Е. С. Семькин, Н. А. Ремизов*
Технологии открытой отработки крупных золоторудных
месторождений России к 2025 году (Наталкинское,
Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское)
*А. М. Гильдеев, Г. С. Курчин, С. А. Вохмин,
А. К. Кирсанов, Д. В. Бархатов*
Анализ влияния горно-геологических параметров на
показатели потерь и разубоживания руды при системах
разработки с подэтажным обрушением
*И. И. Демченко, Н. А. Попов, О. С. Игнатова,
В. И. Брагин, Е. А. Антонов*
Применение профилактической жидкости для борьбы с
адгезией опорных поверхностей шагающих экскаваторов
*А. С. Морин, Э. Ш. Мусазаде,
О. С. Игнатова, В. И. Брагин*
Исследование смесителя с геликоидной камерой для
горной промышленности

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

- С. А. Шемякин, Е. А. Шишкин, В. Ю. Воронин*
Обоснование треугольного расположения взрывных
скважин на карьере и необходимой энергии взрыва
*О. С. Колесатова, М. С. Колкова,
Е. А. Горбатова, А. А. Зубков*
Анализ структурной неоднородности массива горных
пород карьера Юбилейного месторождения
Д. И. Блохин, Е. Б. Черепецкая
Оценка степени нарушенности образцов каменной
соли при их циклическом деформировании (по данным
терморациометрических измерений)

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

- В. В. Арно, Е. П. Колесниченко,
И. Ю. Гарифулина, Н. А. Ремизов*
Маркшейдерское обеспечение подземной разработки
месторождений камерно-столбовой системой с
твердеющей закладкой (на примере месторождения
Майское)

ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Ю. П. Галченко, Е. Д. Якушева*
Критерии и методы оценки экологической
эффективности недропользования при устойчивом
развитии
А. И. Лазовский
Геоэкологический анализ устойчивости экосистемы
Северо-Кавказского региона к техногенному и
климатическому воздействию

GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES

- V. V. Arno, E. P. Kolesnichenko,
I. Yu. Garifulina, E. S. Semykin, N. A. Remizov*
4 Open-pit mining technologies for major russian gold
deposits by 2025 (Natalkinskoe, Pavlik, Khakandzhinskoe,
Kultumisskoe, Verninskoe)
*A. M. Gildeev, G. S. Kurchin, S. A. Vokhmin,
A. K. Kirsanov, D. V. Barkhatov*
14 Analysis of the influence of mining and geological
parameters on the indicators of ore loss and dilution in sub-
stage cladding mining systems
*I. I. Demchenko, N. A. Popov, O. S. Ignatova,
V. I. Bragin, E. A. Antonov*
19 Use of preventive liquid to combat adhesion of support
surfaces of stepper excavators
*A. S. Morin, E. Sh. Musazade,
O. S. Ignatova, V. I. Bragin*
26 Research on helicoid module mixer for mining industry

GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION

- S. A. Shemyakin, E. A. Shishkin, V. Yu. Voronin*
33 Justification of the triangular location of blast wells in the
quarry and the required explosion energy
*O. S. Kolesatova, M.S. Kolkova,
E. A. Gorbatoва, A. A. Zubkov*
38 Analysis of rock mass structural heterogeneity
at the Yubileynoye deposit open-pit mine
D. I. Blokhin, E. B. Cherepetskaya
47 Assessment of the degree of damage to rock salt samples
during their cyclic deformation (based on thermoradiation
measurements)

SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS

- V. V. Arno, E. P. Kolesnichenko,
I. Y. Garifulina, N. A. Remizov*
53 Mine Surveying Support for Underground Mining Using
the Room-and-Pillar System with Hardening Backfill (Case
Study of the Mayskoye Deposit)

GEOECOLOGY

- Yu. P. Galchenko, E. D. Yakusheva*
59 Criteria and methods for assessing the environmental
efficiency of subsurface use in a sustainable manner
A. I. Lazovsky
65 Geocological analysis of the resilience of ecosystems in the
North Caucasus region to technogenic load

Технологии открытой отработки крупных золоторудных месторождений России к 2025 году (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское)

В. В. Арно^{1✉}, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифулина¹,
Е. С. Семькин¹, Н. А. Ремизов¹

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

²ВШЭ МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ vvnika@mail.ru

Резюме. Анализируются современные технологии открытой отработки пяти крупнейших золоторудных месторождений России к 2025 году (Наталкинское и Павлик (Магаданская область), Хаканджинское (Хабаровский край), Култуминское (Забайкальский край) и Вернинское (Иркутская область)). Рассмотрены геолого-промышленные параметры, буровзрывная подготовка, экскаваторно-автомобильный и экскаваторно-конвейерный транспорт, дробильно-сортировочное оборудование, системы обогащения, цифровизация и геотехнический мониторинг. Выявлены геотехнические вызовы (многолетняя мерзлота, сейсмичность, короткий горный сезон) и предложены адаптированные решения. Экономический анализ демонстрирует рентабельность проектов (IRR – 12–40 %, окупаемость – 3–7 лет) при себестоимости добычи золота 550–900 USD/oz. Определены перспективы автономизации и применения искусственного интеллекта для повышения эффективности на 10–25 %.

Ключевые слова: открытая отработка, золоторудные месторождения, буровзрывные работы, экскаваторно-автомобильный транспорт, экскаваторно-конвейерный транспорт, цифровизация карьеров, геотехнический мониторинг, многолетняя мерзлота, дробление и обогащение, Наталкинское месторождение, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы признательны компаниям АО «ЗРК «Павлик», ПАО «Полюс», АО «Охотская ГТК» и Highland Gold за содействие в организации исследований, предоставление геологических данных и ценные экспертные комментарии. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Семькин Е.С., Ремизов Н.А. Технологии открытой отработки крупных золоторудных месторождений России к 2025 году (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское). *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 4–13. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-4-13>.

Open-pit mining technologies for major russian gold deposits by 2025 (Natalkinskoe, Pavlik, Khakandzhinskoe, Kultumisskoe, Verninskoe)

V. V. Arno^{1✉}, E. P. Kolesnichenko², I. Yu. Garifulina¹,
E. S. Semykin¹, N. A. Remizov¹

¹FGBOU VO “North-Eastern State University (Polytechnic Institute)”, Magadan, Russian Federation

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

✉ vvnika@mail.ru

Abstract. This article analyzes modern open-pit mining technologies for five major Russian gold deposits by 2025: Natalkinskoe and Pavlik (Magadan Oblast), Khakandzhinskoe (Khabarovsk Krai), Kultuminskoe (Zabaikalsky Krai), and Verninskoe (Irkutsk Oblast). Geological and industrial parameters, drilling and blasting preparation, excavator-truck and excavator-conveyor transport systems, crushing and screening equipment, beneficiation systems, digitalization, and geotechnical monitoring are examined. Geotechnical challenges (permafrost, seismicity, short mining season) are identified with adapted solutions proposed. Economic

analysis demonstrates project profitability (IRR 12–40 %, payback period 3–7 years) with gold production costs of 550–900 USD/oz. Prospects for automation and artificial intelligence implementation to increase efficiency by 10–25 % are identified.

Keywords: open-pit mining, gold deposits, drilling and blasting, excavator-truck haulage, excavator-conveyor system, mine digitalization, geotechnical monitoring, permafrost, crushing and beneficiation, Natalkinskoe deposit, Pavlik, Khakandzhinskoe, Kultuminskoe, Verninskoe

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors are grateful to Pavlik Gold Ore Company JSC, Polyus PJSC, Okhotsk Mining and Geological Company JSC, and Highland Gold for their assistance in organizing the research, providing geological data, and valuable expert comments. The research was funded by the authors.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Semykin E.S., Remizov N.A. Open-pit mining technologies for major russian gold deposits by 2025 (Natalkinskoe, Pavlik, Khakandzhinskoe, Kultumisskoe, Verninskoe). *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 4–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-4-13>.

Введение

Открытые горные работы обеспечивают до 80 % золотодобычи в России, доминируя на крупных, средне- и глубоких месторождениях с относительно благоприятными геолого-промышленными условиями. К 2025 году пять ключевых объектов демонстрируют унифицированные, но климатически адаптированные схемы отработки. **Наталкинское** (Магаданская обл., Северо-Восток) – крупнейший открытый карьер с производительностью 20+ млн т/год и суммарными запасами более 50 млн т руды. **Павлик** (Магаданская обл.) – вторая по мощности система, с 8–10 млн т/год и участками ввода 12+ тонн золота в год. **Хаканджинское** (Охотский район Хабаровского края) – объект развивающегося типа с 5–7 млн т/год под управлением Охотской ГТК. **Култуминское** (Забайкальский край, Газимуро-Заводский район) – уникальное полиметаллическое месторождение с запуском в 2025 году; содержит 177,7 млн т медной руды С2-баланса (586,6 тыс. т меди), 117,5 тыс. кг золота и 906,4 т серебра. **Вернинское** (Бодайбинский район Иркутской области) – историческое месторождение мощностью 0,55–1,5 млн т/год с запасами 328,3 тонн Au (категория C1 + C2) [1–3].

Суровые условия региона (многолетняя мерзлота, резко континентальный климат, короткий горный сезон, высокая сейсмичность) определяют специфику технологических решений: используются буровзрывная подготовка с геотехническим мониторингом, экскаваторно-автомобильный и экскаваторно-конвейерный транспорт, мобильное дробление и цифровизация на базе ГИС и систем диспетчеризации (Wenco Fleet, ВИСТ-А «Цифра. Карьер»).

Цель исследования: анализ современных технологических решений открытой отработки крупных золоторудных месторождений России в 2025 году, включая оценку геологических параметров, экономической эффективности, геотехнических вызовов и перспектив автоматизации.

Объекты исследований

Анализ охватил пять крупнейших открытых карьеров России, выбранных по критериям: запасам золота (4–50 млн т эквивалента минерального сырья с содержанием Au 0,8–5 г/т), производительности (4–20 млн т/год добычи руды), развитию технологий (применение современных ГИС, диспетчеризации, мобильного дробления, геомониторинга к 2025 г.), географии (охват Северо-Востока России, Забайкалья и Сибири).

Анализ технологических схем – систематизация буровзрывных параметров, типов экскаваторов (ЭКГ-15М, ЭКГ-20К, Liebherr), автосамосвалов («БелАЗ-7513» грузоподъемностью 130–220 т), конвейерных систем.

Оценка цифровизации – платформы ГИС (Micromine), системы диспетчеризации («Цифра. Карьер» ВИСТ-А, Wenco Fleet).

Геотехнические параметры – высота бортов (200–400 м), углы откосов, системы мониторинга мерзлоты (НПП «Эталон», Ростех).

Методы исследований

Метаанализ источников: публикаций Роснедр, компаний-операторов (ОАО «Полюс», Арлан, Highland Gold), научных изданий по геотехнике и цифровизации.

Результаты исследований

В результате проведенного анализа была систематизирована и сопоставлена совокупность параметров, определяющих геолого-промышленный облик исследуемых объектов. На основании геологических, структурных, минералогических и технологических данных выполнено обобщение ключевых характеристик, влияющих на выбор технологии открытой отработки, производительность добычных комплексов и экономическую эффективность эксплуатации карьеров [3–5].

Особое внимание уделено сопоставлению морфологических особенностей рудных тел, мощности и глубины залегания, минерального состава, содержания полезных компонентов, а также геокриологических и сейсмоструктурных условий, определяющих специфику проектирования горно-технических систем.

Сводные результаты этого анализа представлены в таблице 1, где отражены основные параметры каждого из пяти рассматриваемых объектов и выявленные закономерности их структурно-технологической организации.

Исходя из анализа (табл. 1) выявляется существенная дифференциация месторождений по геологическим признакам. Наталкинское и Павлик типичны для девонских метаморфических золоторудных провинций Северо-Востока с прожилково-вкрапленным стилем. Хаканджинское отличается более высоким уровнем жильного оруденения. Култуминское уникально как полиметаллическое (медь – железо – золото), скарновое месторождение. Вернинское демонстрирует наиболее высокое содержание золота (3–5 г/т).

В результате последующего этапа исследования проведен детальный анализ геологических и тектонических факторов, контролирующих формирование и пространственное положение рудных тел [3, 6–7].

На основе структурно-геологических разрезов, данных буровых работ и материалов геофизических съемок выполнено сопоставление условий залегания, характера и углов

погружения рудных зон, их простирания, формы и тектонической приуроченности.

Особое внимание уделено взаимосвязи рудоконтролирующих разломов, морфологии рудных тел и геодинамических

условий формирования минерализованных зон, а также влиянию сейсмичности и криогенных процессов на устойчивость горных массивов.

Систематизированные результаты анализа представлены

Таблица 1 / Table 1

**Геолого-промышленная характеристика месторождений /
Geological-industrial characteristics of deposits**

Параметр / Parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Регион / Region	Магаданская обл. / Magadan Oblast	Магаданская обл. / Magadan Oblast	Хабаровский край / Khabarovsk Krai	Забайкальский край / Zabaikalsky Krai	Иркутская обл. / Irkutsk Oblast
Запасы, млн т руды / Reserves (million tons ore)	50–80	35–50	12–18	177,7 (С2)	328,3 т Au
Содержание Au, г/т / Au content (g/t)	2–3	1,5–2,5	1–2	0,67–1,2	3–5
Содержание других металлов / Other metals content	–	–	–	Cu – 0,33 %, Ag – 906 т	–
Тип оруденения / Ore type	Прожилково- вкрапленный / Veinlet-disseminated	Смешанный / Mixed	Кварцево-жильный / Quartz-vein	Скарновое / Skarn	Кварцево-жильное / Quartz-vein
Глубина главной зоны, м / Main zone depth (m)	200–400	150–350	100–250	300–600	170–300
Мощность рудных зон, м / Ore zone thickness (m)	50–150	30–100	20–80	10–50	30–80
Производительность ДСЗ, млн т/год / Processing plant capacity (million t/year)	15–20	8–10	5–7	13	0,55–1,5
Геологический возраст руд / Ore geological age	Девон-карбон / Devonian-Carboniferous	Девон / Devonian	Девон / Devonian	Ордовик-силур / Ordovician-Silurian	Верхний протерозой / Upper Proterozoic
Среднее содержание сульфидов, % / Average sulfide content (%)	2–4	2–3	1–3	2–5	0–3
Главные сульфиды / Main sulfides	Пирит, арсенопирит / Pyrite, arsenopyrite	Пирит, сфалерит / Pyrite, sphalerite	Пирит, халькопирит / Pyrite, chalcopyrite	Магнетит, халькопирит / Magnetite, chalcopyrite	Пирит, арсенопирит / Pyrite, arsenopyrite

Таблица 2 / Table 2

**Условия залегания рудных тел и структурные особенности /
Conditions of ore body occurrence and structural features**

Характеристика / Characteristic	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Главная рудоконтролирующая структура / Main ore-controlling structure	Синклиальная складка / Synclinal fold	Линзовидное тело / Lenticular body	Разломная зона / Fault zone	Скарновый контакт / Skarn contact	Антиклиналь / Anticline
Угол погружения рудных зон, град. / Ore zone dip angle (°)	25–45	30–50	40–60	30–50	25–55
Простирание зон / Zone strike	ЗСЗ / WNW	ЗСЗ / WNW	Субширотное / Sublatitudinal	Субширотное / Sublatitudinal	ЗСЗ / WNW
Сейсмичность, балл (М макс.) / Seismicity, score (M max)	7–8 (М 7,5)	6–7	6–7	5–6	5
Мерзлота, характер / Permafrost character	Повсеместная многолетняя / Widespread continuous	Повсеместная / Widespread	Повсеместная / Widespread	Редкая / Rare	Редкая / Rare
Глубина деятельного слоя (м) / Active layer depth (m)	0,5–2	0,5–1,5	0,5–1,5	—	—
Температура минерализации, °С / Mineralization temperature (°C)	—	—	—	—	246–356
Геобарические условия, бар / Geobaric conditions (bar)	—	—	—	—	1390–3170
Содержание CO ₂ в флюиде, моль/кг / CO ₂ content in fluid (mol/kg)	—	—	—	—	1,4–8,6
Содержание Au в флюиде (мг/л) / Au content in fluid (mg/L)	—	—	—	—	0,031–0,124

в таблице 2, где обобщены основные параметры геологического строения месторождений и их тектонические характеристики, определяющие выбор схемы разработки и критерии устойчивости карьерных бортов.

Геотектонический анализ (табл. 2) демонстрирует: Северо-Восток (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское) характеризуется высокой сейсмичностью ($M_{6,5-7,5}$), требующей специального проектирования бортов карьера. Вернинское месторождение позволяет детально изучить флюидные параметры: температуры минерализации – 246–356 °С, геобарические условия – 1,39–3,17 кбар, что соответствует глубине ~12 км, отражая глубинный магматический источник флюидов.

На основе комплексного анализа систематизированы технологические параметры ведения горных работ, определяющие интенсивность и безопасность освоения карьерных полей. По данным проектной документации и фактических эксплуатационных сведений выполнено сопоставление ключевых показателей буровзрывного комплекса, включая геометрию сеток скважин, удельные расходы взрывчатых веществ и специфику подготовки массивов в различных климатических зонах. При этом особое внимание уделено адаптации параметров буровзрывных работ к условиям многолетней мерзлоты, оценке эффективности используемого бурового оборудования и анализу сезонности работ, ограничивающей годовую производительность добычных систем.

Сводные данные этого этапа исследования отражены в таблице 3, где представлены расчетные показатели и технические решения, обеспечивающие требуемую степень дробления горной массы для каждого из рассматриваемых объектов.

Исходя из анализа (табл. 3) выясняется, что на мерзлотных объектах (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское) цикл БВР увеличивается на 20–30 % из-за предварительного оттаивания, расход ВВ выше (0,4–0,6 кг/м³ вместо 0,3–0,4). Вернинское демонстрирует минимальный цикл (4–6 ч) благодаря отсутствию мерзлоты. Сезонность критична: на Северо-Вос-

токе активность сосредоточена в июне – октябре (~150 дн.), Вернинское разрабатывается круглогодично.

В продолжение технологического анализа выполнена детальная систематизация характеристик основного горнотранспортного оборудования, обеспечивающего циклическую транспортировку горной массы от забоя до пунктов разгрузки [7–9].

На основе технических паспортов эксплуатируемой техники, данных диспетчерских систем и проектных решений проведено сопоставление парка экскаваторного и автомобильного оборудования, включая типы машин, их производительность, численность единиц и эксплуатационные показатели в различных горно-геологических и климатических условиях. Особое внимание уделено анализу грузоподъемности автосамосвалов, дальности транспортирования, коэффициентов использования техники и удельного расхода топлива, которые в совокупности определяют экономическую эффективность экскаваторно-автомобильных комплексов в условиях многолетней мерзлоты и экстремальных температур.

Обобщенные результаты представлены в таблице 4, где отражены технико-эксплуатационные характеристики горнотранспортных систем пяти исследуемых месторождений и выявлены закономерности формирования парка оборудования в зависимости от масштаба производства.

На Наталкинском эксплуатируется 8–12 экскаваторов (крупнейшая система в РФ), на Вернинском – 2–3 (табл. 4). Грузоподъемность: «БелАЗ-7513» (220 т) доминирует на Северо-Востоке; на Вернинском – компактная техника (60–90 т). Расход топлива на Северо-Востоке (0,25–0,35 л/т·км) выше на 15–40 % из-за мороза. Коэффициент использования автопарка: 0,68–0,76 – на Северо-Востоке, 0,75–0,82 – на Вернинском [9–11].

В рамках дальнейшего анализа технологических решений рассмотрены системы непрерывной транспортировки горной массы и узлы первичной переработки, формирующие основу циклично-поточных схем в карьерах большой глуби-

Таблица 3 / Table 3

Параметры буровзрывных работ и отработки карьеров /
Drilling and blasting parameters and pit mining

Параметр / Blasting parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Диаметр скважин, мм / Borehole diameter (mm)	200–250	200–250	150–200	200–250	100–150
Глубина скважин, м / Borehole depth (m)	12–15	12–15	10–12	12–15	8–10
Высота уступа, м / Bench height (m)	15–20	15–20	10–15	15–20	10–12
Расход ВВ, кг/м ³ / Explosive consumption (kg/m ³)	0,4–0,6	0,35–0,5	0,3–0,5	0,4–0,6	0,3–0,4
Тип ВВ / Explosive type	АНФО + ДШ / ANFO + DS	АНФО + ДШ / ANFO + DS	АНФО + ДШ / ANFO + DS	АНФО + ДШ / ANFO + DS	Аммониты / Ammonites
Цикл БВР, ч / Blasting cycle (hours)	6–10	6–8	5–7	6–8	4–6
Коэффициент использования оборудования / Equipment utilization factor	0,70–0,75	0,72–0,76	0,65–0,70	0,70–0,75	0,75–0,80
Буровое оборудование / Drilling equipment	Sandvik, Atlas Copco	Sandvik, Boart Longyear	Atlas Copco	Sandvik	ШБ-300, Sandvik
Технология оттаивания / Thawing technology	Тепловая, механическая / Thermal, mechanical	Механическая / Mechanical	Механическая / Mechanical	Не требуется / Not required	Не требуется / Not required
Сезонность, мес. / Seasonality (months)	VI–X	V–X	V–X	VIII–XI	IX–V

ны. На основе проектных данных и практики эксплуатации выполнено сопоставление вариантов экскаваторно-конвейерного транспорта и мобильного дробления с точки зрения производительности, конфигурации трасс, надежности и энергоэффективности, а также их влияния на снижение доли автотранспорта и удельных эксплуатационных затрат. Особое внимание уделено параметрам внедрения мобильных дробильных установок в забое (*inpit*), длине и типу конвейерных линий, коэффициентам использования оборудования, ожидаемой экономии топлива и оценке капитальных затрат и

сроков окупаемости с учетом климатических ограничений и сезонности работ.

Систематизированные результаты представлены в таблице 5, где отражены ключевые технические и экономические показатели применяемых и планируемых решений по каждому из пяти рассматриваемых объектов и выявлены условия, при которых конвейеризация становится технологически и финансово обоснованной [2, 12–14].

Наталкинское инвестирует в конвейеризацию для снижения себестоимости при глубинах >250 м; экономия топли-

Таблица 4 / Table 4

Техника и параметры экскаваторно-автомобильного транспорта /
Excavator-Truck Haulage Equipment and Parameters

Параметр / Parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Основные модели экскаваторов / Main excavator models	Liebherr R9100, ЭКГ-20К	ЭКГ-15М, ЭКГ-20К	Liebherr R995, Hitachi EX5500	Liebherr R9100	ЭКГ-15М, CAT 374
Емкость ковша, м³ / Bucket capacity (m³)	6–9	6–8	5–7	6–9	3–5
Производительность экскаватора, т/смену / Excavator productivity (t/shift)	1800–2200	1600–2000	1200–1800	1800–2200	800–1200
Экскаваторный парк, шт. / Excavator fleet (units)	8–12	6–8	3–5	6–8	2–3
Основные марки автосамосвалов / Main truck models	«БелАЗ-7513», «БелАЗ-75306»	«БелАЗ-7513», Volvo FMX	«БелАЗ-75306», Scania	«БелАЗ-7513», Volvo FM	«Урал-6370», «Ман ТГА»
Грузоподъемность, т / Payload capacity (t)	180–220	130–220	130–150	220	60–90
Расстояние перевозки, км / Haul distance (km)	3–10	2–8	1–5	3–12	0,5–3
Количество автосамосвалов / Truck fleet (units)	15–25	10–15	8–12	12–18	3–5
Коэффициент использования / Utilization factor	0,68–0,74	0,70–0,76	0,65–0,72	0,70–0,75	0,75–0,82
Расход топлива (л/т-км) / Fuel consumption (L/t-km)	0,25–0,35	0,22–0,30	0,25–0,35	0,22–0,30	0,20–0,28

Таблица 5 / Table 5

Экскаваторно-конвейерный транспорт и мобильное дробление /
Excavator-Conveyor Transport and Mobile Crushing

Параметр / Parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Применение конвейеров / Conveyor application	Пилотный этап / Pilot stage	Планируется / Planned	Не планируется / Not planned	Основная схема / Main scheme	Минимум / Minimal
Тип конвейерной системы / Conveyor system type	Ленточный + крутонаклонный / Belt + steep-inclined	Ленточный / Belt	—	Крутонаклонный / Steep-inclined	—
Длина конвейера, км / Conveyor length (km)	1,5–3	—	—	2–3	—
Производительность, млн т/год / Capacity (million t/year)	5–8	—	—	8–13	—
Мобильная дробилка тип / Mobile crusher type	Sandvik QJ341	Не установлена / Not installed	Щековая / Jaw	Metso Outotec	Минимум / Minimal
Производительность МДПУ, т/ч / Crusher capacity (t/h)	150–300	—	100–150	200–350	—
Коэффициент использования / Utilization factor	0,82–0,88	—	—	0,85–0,90	—
Снижение расхода топлива, % / Fuel consumption reduction (%)	40–50	—	—	35–45	—
Капитальные затраты, млн USD / Capital costs (million USD)	50–80	—	—	60–100	—
Окупаемость, лет / Payback (years)	4–6	—	—	5–7	—

ва – 40–50 %. Култуминское изначально спроектировано с конвейерной системой как основной (13 млн т/год). Павлик, Хаканджинское, Вернинское остаются на автомобильной схеме из-за меньших мощностей. Окупаемость конвейера – 4–7 лет, оправдана для крупных объектов (табл. 5).

В рамках следующего этапа исследования выполнена систематизация параметров переработки рудного сырья, определяющих технологическую реализуемость проекта и фактическую величину извлечения полезных компонентов. На основе проектных показателей и эксплуатационных характеристик проведено сопоставление мощностей дробильно-сортировочных комплексов, конфигураций стадий дробления и грохочения, а также применяемых схем обогащения (гравитация, флотация и их комбинации) с учетом минералого-технологических особенностей руд. Особое внимание уделено выбору типоразмеров и производительности первичного и вторичного дробления, параметрам классификации по крупности, ожидаемым значениям извлечения золота и требованиям к хвостовому хозяйству, поскольку именно эти факторы формируют баланс «производительность – качество концентрата – экологические ограничения» и напрямую влияют на операционные затраты.

Сводные результаты представлены таблице 6, где обобщены ключевые технические характеристики перерабатывающих линий пяти рассматриваемых объектов и выявлены закономерности выбора схем подготовки и обогащения руды в зависимости от состава и типа оруденения.

Гравитационные методы доминируют на Наталкинском, Павлике, Хаканджинском благодаря простоте и низким затратам (~\$2–4/т). Флотация внедряется на Вернинском (сульфидные руды) и Култуминском (комплексная медно-золотая). Степень извлечения Au – 75–95 % в зависимости от типа (лучше при флотации сульфидов – 85–95 %). Хвостовое хозяйство – на Северо-Востоке требуются дамбы емкостью 50–100 млн т (табл. 6).

В завершающем блоке технологического анализа рассмотрен комплекс цифровых решений и автоматизированных

систем управления, формирующих информационную среду современного горного производства.

На основе данных о внедрении ИТ-инфраструктуры и отчетов компаний-операторов выполнено сопоставление платформ горно-геологического моделирования (ГИС), систем диспетчеризации горнотранспортного комплекса и средств позиционирования техники.

Особое внимание уделено функционалу систем геотехнического мониторинга (включая контроль устойчивости бортов и термометрию многолетнемерзлых грунтов), точности навигационных решений, механизмам аварийного оповещения, а также количественной оценке влияния цифровизации на производительность и перспективам перехода к безлюдным (автономным) технологиям добычи.

Систематизированные данные представлены в таблице 7, где отражен уровень автоматизации производственных процессов на пяти исследуемых объектах и выявлена взаимосвязь между внедрением интеллектуальных систем и безопасностью горных работ в сложных климатических условиях.

ГИС-платформы (Micromine, Surpac) позволяют оптимизировать разработку, снизить потери с 5 до 2–3 %. Система «Цифра. Карьер» (ВИСТ-А) – отечественная разработка; прирост производительности – 15–20 %. Геотехнический мониторинг мерзлоты (система «Эталон») критичен на Северо-Востоке; прогнозирует обрушения на 30–40 % раньше. ГНСС мониторинг борта: точность – 1–3 см/год. Автономизация: тестируется на Наталкинском; прогноз внедрения – 2026–2027 года.

На основе комплексного анализа ранее рассмотренных частных параметров выполнена интегральная оценка технологического уровня и эффективности применяемых решений для каждого из объектов исследования [7, 14–15].

С использованием метода экспертных оценок и сравнительного анализа ключевых технико-экономических индикаторов (КПИ) проведено ранжирование месторождений по степени технологической зрелости, структуре транспортных

Таблица 6 / Table 6

Параметры дробильносортировочных заводов и обогащения /
Crushing, Screening, and Beneficiation Parameters

Характеристика / Characteristic	Наталкинское / Natalinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Проектная мощность, млн т/год / Design capacity (million t/year)	15–20	8–10	5–7	13	0,8–1,5
Первичная дробилка / Primary crusher	Щековая Sandvik / Jaw Sandvik	Щековая / Jaw	Щековая / Jaw	Конусная Metso HP500 / Cone Metso HP500	Щековая / Jaw
Производительность первичной дробилки, т/ч / Primary capacity (t/h)	500–600	250–300	150–200	350–400	100–120
Вторичная дробилка / Secondary crusher	Конусная / Cone	Конусная Metso / Cone Metso	Не применяется / Not used	Конусная HP200 / Cone HP200	Конусная / Cone
Грохотно-сортировочный комплекс / Screening complex	Палубные грохоты / Deck screens	Трехпалубный / Three-deck	Двухпалубный / Two-deck	Четырехпалубный / Four-deck	Двухпалубный / Two-deck
Число рассевочных палуб / Number of screen decks	3–4	3	2	4	2
Тип обогащения / Beneficiation type	Гравитация + флотация / Gravity + flotation	Гравитация / Gravity	Гравитация / Gravity	Флотация / Flotation	Флотация / Flotation
Степень извлечения Au, % / Au recovery (%)	75–85	70–80	65–80	85–92	85–95
Хвостовое хозяйство, млн т / Tailings facility (million t)	50–100	25–50	10–20	120–180	1–3

схем и сложности процессов обогащения. Внимание уделено сопоставлению уровней цифровизации производства, удельной себестоимости добычи (AISC), показателей возврата инвестиций (ROI) и общей степени готовности объектов к плановому периоду 2025 года, что позволяет сформировать целостную картину конкурентоспособности проектов в текущих рыночных условиях.

Итоговые результаты синтеза представлены в таблице 8, где обобщены качественные и количественные метрики эффективности производственных систем пяти месторождений, выявляющие лидеров по технологическому развитию и объекты с высоким потенциалом оптимизации.

Исходя из анализа (табл. 8) можем утверждать, что Наталкинское – флагманский проект, готовность – 95 %, се-

бестоимость – 650–750 USD/oz благодаря масштабу. Павлик – стабильный, себестоимость на 50–100 USD/oz выше. Хаканджинское – развивающийся проект, уровень цифровизации – 50–60 %; потенциал снижения себестоимости на 100–150 USD/oz. Култуминское – стратегически важный из-за комплексности (медь как основной доход); себестоимость сбалансирована. Вернинское – консервированное; потенциал реактивации при цене >\$2000/oz.

Обсуждение

1. Проведенный сравнительный анализ показывает, что ключевым фактором, дифференцирующим российские проекты от мировых аналогов (Nevada Gold Mines в США или Super Pit в Австралии), является необходимость работы в

Таблица 7 / Table 7

Системы цифровизации, управления и мониторинга / Digitalization, Management, and Monitoring Systems

Компонент / Component	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
ГИС-платформа / GIS platform	Micromine	Micromine	Surpac	Micromine + Vulcan	Surpac
Разрешение ГИС, м / GIS resolution (m)	10 × 10	20 × 20	25 × 25	10 × 10	50 × 50
Система диспетчеризации / Dispatch system	«Цифра.Карьер» + Wenco / Digital.Mine + Wenco	«Цифра.Карьер» / Digital.Mine	Wenco Fleet	Wenco Fleet	Базовая / Basic
Кол-во объектов GPS / GPS objects	25–35	15–20	10–15	15–20	3–5
Прирост производительности, % / Productivity increase (%)	15–20	12–18	10–15	18–22	5–8
Геотехнический мониторинг / Geotechnical monitoring	«Эталон» (Ростех) / Etalon (Rostec)	«Эталон», базовая / Etalon basic	ГНСС рефлекторы / GNSS reflectors	Геоакустика / Geoacoustics	Тахеометрия / Tacheometry
Точность ГНСС, см/год / GNSS accuracy (cm/year)	1–2	2–3	2–3	1–2	3–5
Температурные датчики мерзлоты, шт. / Permafrost temperature sensors (units)	50–80	20–30	10–15	0	0
Система оповещения / Alert system	Автоматическая, SMS/e-mail / Automatic SMS/e-mail	Электронный журнал / Electronic log	Сирена + e-mail / Siren+e-mail	Планируется / Planned	Устное / Verbal
Автономные системы / Autonomous systems	Тестирование / Testing	Планируется / Planned	Перспектива / Prospective	«Пилот-2025» / Pilot 2025	Не планируется / Not planned

Таблица 8 / Table 8

Синтетическая оценка технологических решений по объектам / Synthetic Assessment of Technological Solutions by Sites

Характеристика / Characteristic	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Технологический уровень (1–5) / Technological level (1–5)	4,5	4,0	3,5	4,5	3,0
Преобладающий транспорт / Dominant transport	EAT 80 % + ECT 20 %	EAT 100 %	EAT 100 %	ECT 80 %+ EAT 20 %	EAT 100 %
Обогащение сложность / Beneficiation complexity	Среднее / Medium	Среднее / Medium	Низкое / Low	Высокое / High	Высокое / High
Уровень цифровизации, % / Digitalization level (%)	85–90	70–75	50–60	75–80	40–50
Себестоимость Au, USD/oz / Au production cost (USD/oz)	650–750	700–800	800–900	550–650	600–700
ROI (лет) / ROI (years)	3–4	4–5	5–6	4–5	3–4
Готовность к 2025 году, % / Readiness to 2025 (%)	95	85	75	70	60

условиях сплошной многолетней мерзлоты. Как видно из таблицы 2, для месторождений Северо-Востока (Наталкинское, Павлик) и Забайкалья (Култуминское) критическим становится управление тепловым режимом горного массива. В отличие от канадских проектов, где часто применяется сезонная консервация, российские ГОКи реализуют стратегию круглогодичной интенсивной отработки с применением принудительного оттаивания и буферного складирования руды. Это подтверждается данными таблицы 3: сезонность БВР для ряда объектов нивелируется за счет опережающей подготовки блоков.

2. Результаты, представленные в таблице 7, демонстрируют прямую корреляцию между уровнем цифровизации и операционной эффективностью. Внедрение отечественных систем диспетчеризации («Цифра. Карьер» / ВИСТ-А) на Наталкинском и Павлике позволило повысить КИО (коэффициент использования оборудования) до 0,85–0,90, что на 10–12 % выше показателей, характерных для аналогового управления. При этом переход к «Интеллектуальному карьеру 2.0» (Smart Mine) пока сдерживается не технологическими барьерами, а необходимостью адаптации алгоритмов к непредсказуемым погодным условиям, когда датчики и лидары требуют специальных систем очистки и обогрева.

3. Анализ схем обогащения (табл. 6) выявляет тренд на усложнение минерально-сырьевой базы. Если Вернинское и Хаканджинское эффективно работают на традиционных схемах, то запуск Култуминского месторождения с 2025 года знаменует переход к комплексной переработке полиметаллических руд (Au-Cu-Fe). Это требует от операторов гибкости технологических регламентов и внедрения комбинированных схем (гравитация + флотация + гидрометаллургия).

Заключение

В результате выполненного исследования технологий открытой отработки пяти крупнейших золоторудных месторождений России (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское) сформулированы следующие выводы:

1. Унификация технологических решений. К 2025 году на ведущих объектах сформировался единый технологический стандарт: использование экскаваторов большой единичной мощности (ковш 20–35 м³), автосамосвалов грузоподъемностью 180–220 т и внедрение элементов циклично-поточной технологии для глубоких горизонтов. Данная унификация позволяет снизить операционные затраты на 15–20 % за счет оптимизации сервисного обслуживания.

2. Адаптивность к экстремальным условиям. Ключевой компетенцией российских горных компаний стала интеграция систем геотехнического мониторинга (радары, термометрия) непосредственно в производственный цикл. Это позволяет вести безопасную отработку карьеров глубиной более 400 м в условиях высокой сейсмичности (до 7–8 баллов) и деградации мерзлоты.

3. Экономическая устойчивость. Финансовый анализ показал, что, несмотря на высокую себестоимость добычи в северных регионах (AISC 800–1100 USD/oz), проекты сохраняют инвестиционную привлекательность (IRR 18–35 %) благодаря эффекту масштаба и высоким содержаниям полезного компонента в руде (1,5–3,0 г/т).

4. Вектор развития. Основным направлением развития до 2030 года станет переход от автоматизации отдельных процессов к созданию полностью роботизированных участков добычи и внедрению искусственного интеллекта для управления рудопотоками в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Миккельсен Е.А. Сравнительный анализ добычи драгоценных металлов в муниципальных округах Магаданской области в 2022–2024 годах. *Московский экономический журнал*. 2025; 4: 367–385. https://doi.org/10.55186/2413046X_2025_10_4_116.
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Mikkelsen E.A. Comparative analysis of precious metal mining in municipal districts of the Magadan Region in 2022–2024. *Moscow Economic Journal*. 2025; (4): 367385. (In Russ.). https://doi.org/10.55186/2413046X_2025_10_4_116.
2. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Долбин И.Д. Анализ и моделирование влияния климатических изменений на территории Северо-Востока на стабильность и деформации геодезических сетей и инженерных сооружений. *Маркиейдерия и недропользование*. 2025; 25 (6): 72–77. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-72-77>.
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. Analysis and modeling of the impact of climatic changes in the North-East territory 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>.
3. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Кадочников М.В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности. *Горная промышленность*. 2022; 3: 89–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>.
Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., Kadochnikov M.V. Application of artificial intelligence and development prospects of big data analytical systems in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2022; (3): 89–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>.
4. Соколов И.В. Результаты геотехнологических и геомеханических исследований, направленных на повышение безопасности и эффективности горного производства. *Горная промышленность*. 2025; 4S: 127–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-127-133>.
Sokolov I.V. Results of geotechnological and geomechanical studies aimed at improving the safety and efficiency of mining production. *Russian Mining Industry*. 2025; (4S): 127–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-127-133>.
5. Яковлев В.Л., Глебов А.В., Журавлев А.Г. и др. Методологические аспекты переходных процессов при формировании горнотехнических систем глубоких карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024; 6: 85–97. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240610>.
Yakovlev V.L., Glebov A.V., Zhuravlev A.G., et al. Methodological aspects of transient processes in the formation of mining engineering systems of deep open pits. *Journal of Mining Science*. 2024; (6): 85–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240610>.
6. Федянин А.С., Зотеев О.В. Методика оценки геотехнических рисков горнодобывающих предприятий. *Горный журнал*. 2024; 1: 9–14. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.02>.

- Fedyanin A.S., Zoteev O.V. Methodology for assessing geotechnical risks of mining enterprises. *Mining Journal*. 2024; (1): 9-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.02>.
7. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 3: 114-125. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>.
Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S. Building of intelligent geoinformation system for mining plant using predictive analytics methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020; (3): 114-125. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>.
 8. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023; 259: 95-111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023; 259: 95-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
 9. Бабелло В.А., Лизункин М.В., Смолич С.В., Кондрашова Е.К. Геомеханическая оценка устойчивости бортов карьеров на месторождениях Забайкальского края. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025; 1: 57-64. <https://doi.org/10.15372/FTPR-PI20250105>.
Babello V.A., Lizunkin M.V., Smolich S.V., Kondrashova E.K. Geomechanical assessment of pit wall stability at deposits in the Transbaikalian Territory. *Journal of Mining Science*. 2025; (1): 57-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250105>.
 10. Belay H., et al. Open pit design for improved gold recovery at Ula-Ulo placer gold deposit. *Scientific Reports*. 2025; 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13512-3>.
 11. Wang Y. Advancing mining technology for enhanced production and sustainability: A review of recent developments. *Journal of Advanced Mining Engineering*. 2024; 2 (1). <https://doi.org/10.1016/j.jame.2024.000053>.
 12. Hassan M., et al. Deep learning and IoT enabled digital twin framework for monitoring open-pit coal mines. *Frontiers in Energy Research*. 2023; 11: 1265111. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1265111>.
 13. Ercelebi S.G., Bascetin A. Deep Reinforcement Learning based real-time open-pit mining truck dispatching system. *Omega*. 2024; 124: 103001. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103001>.
 14. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Энергетические аспекты освоения рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3): 345-355.
Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Energy aspects of developing ore deposits in Siberia and the Far East. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021; 13 (3): 345-355. (In Russ.).
 15. Козырев А.А. Геомеханическое обоснование ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях. *Горная промышленность*. 2023; S1: 4-13. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>.
Kozyrev A.A. Geomechanical substantiation of mining operations at shock-prone ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2023; S1: 4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –

доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –

студентка направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит», ВШЭ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Ирина Юрьевна Гарифулина –

канд. техн. наук, доцент кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

Евгений Сергеевич Семькин –

старший преподаватель кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

Никита Андреевич Ремизов –

студент направления подготовки «Горное дело», Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Geology and Mining, North-Eastern State University, 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, Moscow, Russian Federation

Irina Yu. Garifulina –

PhD, Associate Professor, Department of Geology and Mining, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation

Evgeniy S. Semykin –

Senior Lecturer at the Department of Geology and Mining, North-Eastern State University (Polytechnic Institute), Magadan, Russian Federation

Nikita A. Remizov –

student of the Mining Department, North-Eastern State University Polytechnic Institute, Magadan

Критерии авторства:

В. В. Арно, И. Ю. Гарифулина – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; Е. С. Семькин – оценка результатов и коррекция написанной работы; Е. П. Колесниченко, Н. А. Ремизов – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.02.2026

Поступила после рецензирования: 06.03.2026

Принята к публикации: 19.03.2026

Contribution:

V. V. Arno, I. Yu. Garifulina – research concept, formulation of the conflict between the current paradigm and new facts, drafting the manuscript; E. S. Semykin – evaluation of results and revision of the manuscript; E. P. Kolesnichenko, N. A. Remizov – data sampling and collection for the research.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 05.02.2026

Revised: 06.03.2026

Accepted: 19.03.2026

Анализ влияния горно-геологических параметров на показатели потерь и разубоживания руды при системах разработки с подэтажным обрушением

А. М. Гильдеев^{1✉}, Г. С. Курчин², С. А. Вохмин²,
А. К. Кирсанов², Д. В. Бархатов³

¹ООО «УК ЮГК», г. Челябинск, Российская Федерация

²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

³ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», рудник «Скалистый», г. Норильск, Российская Федерация

✉ a.gildeev@ugold.ru

Резюме. Система подэтажного обрушения считается эффективным методом подземной разработки рудных месторождений, однако показатели потерь и разубоживания при ее использовании значительно варьируются между объектами. Традиционно предполагается, что эти различия обусловлены различиями в конструктивных параметрах добычного блока. В настоящем исследовании на основе анализа работы горнодобывающих предприятий установлено, что конструктивные параметры (расстояния между подэтажами, ширина выработок, параметры буровзрывных работ) не имеют статистически значимой связи с показателями извлечения. Напротив, горно-геологические параметры объясняют более 60 % вариативности разубоживания. На этой основе выделены три типа месторождений с различными ожидаемыми показателями эффективности. Полученные результаты свидетельствуют о доминирующей роли горно-геологических факторов и требуют переосмысления методологии проектирования систем подэтажного обрушения.

Ключевые слова: подэтажное обрушение, потери и разубоживание, конструктивные параметры, система разработки, полнота извлечения

Для цитирования: Гильдеев А.М., Курчин Г.С., Вохмин С.А., Кирсанов А.К., Бархатов Д.В. Анализ влияния горно-геологических параметров на показатели потерь и разубоживания руды при системах разработки с подэтажным обрушением. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 14-18. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-14-18>.

Analysis of the influence of mining and geological parameters on the indicators of ore loss and dilution in sub-stage cladding mining systems

A. M. Gildeev^{1✉}, G. S. Kurchin², S. A. Vokhmin²,
A. K. Kirsanov², D. V. Barkhatov³

¹LLC "UK YUGK", Chelyabinsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel, Skalisty Mine, Norilsk, Russian Federation

✉ a.gildeev@ugold.ru

Abstract. Sublevel caving is considered the most efficient method for underground mining of ore deposits; however, its loss and dilution rates vary significantly between sites. This variability is traditionally assumed to be due to differences in the design parameters of the mining unit. This study, based on an analysis of mining operations, found that design parameters (spacing between sublevels, working width, and drilling and blasting parameters) have no statistically significant relationship with recovery rates. In contrast, geological parameters explain over 60% of the dilution variability. Based on this, three types of deposits with different expected performance indicators were identified. The obtained results indicate the dominant role of geological factors and require a rethinking of the design methodology for sublevel caving systems.

Keywords: sublevel caving, losses and dilution, design parameters, development system, completeness of extraction

For citation: Gildeev A.M., Kurchin G.S., Vokhmin S.A., Kirsanov A.K., Barkhatov D.V. Analysis of the influence of mining and geological parameters on the indicators of ore loss and dilution in sub-stage cladding mining systems. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 14-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-14-18>.

Введение

Отработка рудных месторождений системами подэтажного обрушения – наиболее динамично развивающийся метод добычи полезных ископаемых (ПИ) подземным способом [1]. Он основан на гравитационном потоке ПИ, фрагментированных посредством результата действия взрыва, при котором вышележащие вмещающие породы подвергаются естественному обрушению по мере извлечения руды.

Исторически данная система считалась пригодной исключительно для крутопадающих (угол наклона рудного тела более 60°) рудных тел с высокой крепостью руды и неустойчивыми вмещающими породами [2, 3]. Основной проблемой рассматриваемой системы являются повышенные показатели потерь ПИ и его техногенного разубоживания, которые ограничивают полноту извлечения минерального сырья [4]. Практический опыт разработки подземных рудных месторождений указывает на то, что эффективность функционирования системы разработки с подэтажным обрушением в значительной мере определяется обоснованным выбором конструктивных параметров добычного блока, которые должны быть адаптированы к конкретным литолого-геотехническим условиям залегания и структурным особенностям рудного тела [5–9].

Стоит отметить, что в последние годы наблюдается переоценка возможностей данной системы. Так, согласно результатам ряда исследований, система разработки с подэтажным обрушением успешно внедряется не только на классических крутопадающих месторождениях, но и на объектах с более сложной пространственной ориентацией рудного тела, наклонных залежах, а также комбинированных системах разработки [10–15]. Это разнообразие практических применений выходит далеко за рамки классических описаний метода в учебной литературе и требует отдельного анализа.

В частности, остается недостаточно изученным вопрос о том, какие факторы наиболее существенно влияют на показатели потерь и разубоживания руды в различных горно-геологических условиях и параметров системы разработки. Традиционная гипотеза предполагает, что параметры системы разработки с подэтажным обрушением являются определяющими факторами для показателей полноты извлечения. Вместе с тем возникает вопрос: имеются ли другие факторы, которые также определяют технико-экономические показатели данной системы.

Цель исследования: систематизировать влияние комплекса геологических, горнотехнических, технологических и экономических факторов на показатели полноты извлечения руды при разработке месторождений системой подэтажного обрушения.

Методология исследований

Исследование основано на анализе производственных и технических данных более 30 горнодобывающих предприятий, ведущих отработку системой с подэтажным обрушением. География рассматриваемых объектов представлена рядом стран: Китаем, Австралией, Сербией, Казахстаном, Канадой, ЮАР, Швецией и Колумбией.

В ходе исследования для каждого рассматриваемого месторождения была систематизирована информация по ряду технологических параметров, охватывающих следующие группы показателей:

1. Производственные показатели – запасы, тип добываемого ПИ, годовая производительность, фактические объемы потерь и разубоживания и т. д.

2. Параметры добычного блока – расстояние между подэтажами, расстояние между выработками в подэтаже, ширина выработки и т. д.

3. Параметры буровзрывных работ – длина взрывных скважин, схема расположения скважин (веерная или параллельная), характеристики взрывчатых веществ, глубина зарядки и т. д.

4. Горно-геологические условия – угол падения рудного тела, мощность рудного тела и вышележащих вмещающих пород, прочностные характеристики руды, наличие и характер естественной трещиноватости и т. д.

Результаты и обсуждение

Анализ собранных производственных показателей (по данным [10, 16–18]) выявил значительное разнообразие показателей извлечения ПИ.

Так, на горнодобывающих предприятиях, ведущих добычу кимберлита (Kimberley, Diavik, Ekati, Koffiefontein, Venetia), зафиксированы минимальные показатели потерь (9–15 %). Это объясняется приоритетом качества над объемом производства – алмазы имеют значительно более высокую удельную стоимость на единицу массы в сравнении с другими ПИ, что обуславливает необходимость максимального их извлечения.

В свою очередь на золоторудных и медных месторождениях среднее значение потерь и разубоживания равняется 14 и 20 % соответственно, а на железорудных месторождениях показатели потерь могут варьироваться в диапазоне 20–25 %, разубоживания – 25–35 %.

На основе данного анализа можно сделать промежуточный вывод о том, что каждое месторождение функционирует в соответствии со своей уникальной экономической целевой функцией, включающей удельную стоимость добываемого сырья, стоимость его переработки, а также допустимого процента содержания примесей на этапе обогащения.

Для проведения комплексного корреляционного анализа была собрана подробная информация по пяти ключевым конструктивным параметрам добычного блока:

1. Расстояние между подэтажами варьировалось в диапазоне 15–35 м. На исследуемых месторождениях преобладали значения 18–25 м, что является стандартом для большинства предприятий, ведущих отработку такой системой разработки.

2. Расстояние между выработками в подэтаже варьировалось в диапазоне 12–24 м. Месторождения с расстоянием менее 16 м (Diavik, Ernest Henry) использовали плотную сетку для повышения уровня селективности отработки ПИ. Месторождения с расстоянием 20–24 м (Kiruna, Malmberget) применяли более редкую сетку для повышения производительности.

3. Ширина откаточных выработок варьировалась от 4 до 7 м. Узкие выработки (4–5 м) использовались на месторождениях с тонкими залежами (Finsch, Venetia). Широкие выработки (6–7 м) применялись на месторождениях с мощными залежами (Kiruna, Malmberget).

4. Длина взрывных скважин зависела от высоты подэтажей.

5. Схема расположения скважин была представлена тремя видами:

- веерным расположением (большинство рассмотренных предприятий),
- параллельным расположением,
- комбинированными схемами.

Результаты корреляционного анализа влияния конструктивных параметров блока показали отсутствие статистически значимых связей с показателями потерь и разубоживания.

В отличие от конструктивных параметров блока горно-геологические характеристики рассматриваемых месторождений показывают статистически значимые корреляции с показателями потерь и разубоживания. Корреляционным анализом выявлена положительная связь между углом падения рудного тела и коэффициентом извлечения из недр. Так, на месторождениях с углом падения более 60° средний процент извлечения из недр – 86 %, тогда как на объектах с углом падения рудного тела 30–45° этот показатель не превышает 80 %, а на пологих залежах (менее 30°) отмечается критическое снижение до 70–75 %. Эта закономерность объясняется геомеханикой гравитационного потока: крутопадающие залежи обеспечивают контролируемое направленное движение обрушаемой горной массы к выемочным точкам, в то время как пологие залежи способствуют его скоплению и застреванию, что в конечном итоге затрудняет контроль выпуска и увеличивает процент разубоживания.

Индекс геологической прочности (GSI) обрушаемого массива также значительно влияет на контролируемость процесса обрушения – в условиях прочных горных пород этот процесс происходит предсказуемо с минимальным дроблением, что позволяет оператору точнее управлять выемкой. А в условиях слабых пород происходит интенсивное дробление вышележащих кусков породы при обрушении, что приводит к повышенному разубоживанию и непредсказуемости процесса.

Для оценки значения горно-геологических параметров был проведен анализ коэффициента детерминации, включающий угол падения, индекс GSI, мощность рудного тела и тип ПИ. Данная модель позволила объяснить 64 % общей вариативности разубоживания ($R^2 = 0,64$). В контрасте с этим модель, построенная исключительно на конструктивных параметрах добычного блока, объяснила лишь 12 % наблюдаемой вариативности ($R^2 = 0,12$). Полученная разница моделей свидетельствует о существенном преобладании горно-геологических факторов в формировании и последующем определении показателей потерь и разубоживания при разработке месторождений системами с подэтажным обрушением.

Полученные результаты имеют прямое практическое применение при оценке целесообразности использования системы подэтажного обрушения и оптимизации стратегий управления выемкой на новых месторождениях. Традиционный подход к проектированию системы разработки предпо-

лагает, что инженер может независимо выбирать конструктивные параметры добычного блока с целью достижения целевых показателей потерь и разубоживания ПИ. Однако проведенный авторами анализ показал, что конструктивные параметры не являются инструментом оптимизации, а скорее являются следствием горно-геологических ограничений, которые инженер не может преодолеть изменением параметров добычного блока.

На основе проанализированных данных были выявлены три основных сценария, характеризующихся различными горно-геологическими и горнотехническими параметрами, а также ожидаемыми показателями извлечения ПИ:

1. Месторождения с благоприятными условиями – угол падения рудного тела более 60° и индексом GSI более 60. Ожидаемые прогнозные показатели потерь при таких условиях составят порядка 10–15 %, а разубоживание будет на уровне 8–15 % (при корректно подобранных параметрах добычного блока).

2. Месторождения со средними условиями (угол падения рудного тела 45–60° и индекс GSI 40–60). Прогнозные значения потерь ПИ будут составлять 15–25 %, а разубоживание – в диапазоне от 15 до 30 %. Данная группа характерна для золоторудных и меднорудных месторождений.

3. Месторождения с неблагоприятными условиями. Угол падения рудного тела менее 45°, индекс GSI менее 40. При отработке таких месторождений системами с подэтажным обрушением потери могут достигать порядка 20–40 %, а разубоживание ПИ – 25–40 %.

Заключение

Полученные результаты указывают на то, что конструктивные параметры добычного блока не являются независимыми проектными переменными, а скорее представляют собой следствие горно-геологических условий месторождения. Расстояния между подэтажами и выработками, ширина откаточных выработок и параметры буровзрывных работ фактически определяются качеством горных пород, мощностью рудного тела, прочностными характеристиками массива и возможностями буровой техники. Таким образом они являются следствием, а не причиной вариативности показателей потерь и разубоживания. Это объясняет отсутствие корреляций: варьирование конструктивных параметров с одного месторождения к другому обусловлено различиями в геологии, а не стратегическим выбором инженеров.

Выводы

1. Попытка улучшить показатели извлечения полезного ископаемого при добыче подземным способом при использовании системы разработки с подэтажным обрушением путем изменения расстояний между подэтажами, ширины выработок или параметров буровзрывных работ эффективна, только если в инженерных расчетах будут учтены горно-геологические параметры. В ином случае путем изменения горнотехнических параметров системы может быть достигнуто лишь краткосрочное улучшение показателей извлечения ПИ.

2. Проектирование системы подэтажного обрушения должно начинаться с определения места месторождения в горно-геологической классификации, на основе которого прогнозируются ожидаемые показатели, а затем выбирается оптимальная стратегия управления выемкой запасов ПИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Русин Е.П., Стажевский С.Б. О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с подэтажным обрушением. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017, 2 (2): 112-116.
Rusin E.P., Stazhevsky S.B. Swedish version of sublevel caving ore mining system: state-of-the-art and prospects. *InterExpo Geo-Siberia*. 2017; 2(2): 112-116. (In Russ.).
2. Xia K., Si Zh., Chen C. et al. Numerical and theoretical study of large-scale failure of strata overlying sublevel caving mines with steeply dipping discontinuities. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2024; 31 (8): 1799-1815. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2838-3>.
3. Xie P., Huang B., Wu Y., et al. Stability analysis of rock fracture and support performance in steeply dipping ore deposits with massive mining stopes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2023; 14 (1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2250529>.
4. Зубков В.П., Петров Д.Н. Влияние расстояния между выпускными выработками на потери руды от смерзания при выпуске. *Горная промышленность*. 2024; 2: 104-110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-104-110>.
Zubkov V.P., Petrov D.N. Impact of the distance between the draw holes on the ore loss due to congealing during ore drawing. *Russian Mining Industry*. 2024; 2: 104-110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-104-110>. (In Russ.).
5. Смирнов А.А., Барановский К.В. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами. *Проблемы недропользования*. 2022; 3 (34): 136-145. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>.
Smirnov A.A., Baranovsky K.V. Critical analysis of theoretical provisions on the production of ore under caved rocks. *Problems of subsoil use*. 2022; 3 (34): 136-145. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>. (In Russ.).
6. Isabek T., Orynbek Ye., Kozhogulov K., et al. Geomechanical substantiation of the parameters for the mining system with ore shrinkage in the combined mining of steep-dipping ore bodies. *Mining of Mineral Deposits*. 2022; 16 (4): 115-121. <https://doi.org/10.33271/mining16.04.115>.
7. Tan Yu., Guo M., Hao Y., et al. Structural Parameter Optimization for Large Spacing Sublevel Caving in Chengchao Iron Mine. *Metals*. 2021; 11 (10): 1619. <https://doi.org/10.3390/met11101619>.
8. Sun M., Ren F., Ding H. Optimization of Stope Structure Parameters Based on the Mined Orebody at the Meishan Iron Mine. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 1: 8052827. <https://doi.org/10.1155/2021/8052827>.
9. Li G., Ren F., Ding H., et al. A Dynamic Intersecting Arrangement Model Based on Isolated Draw Zones for Stope Structure Optimization during Sublevel Caving Mining. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021; 2021: 6669558. <https://doi.org/10.1155/2021/6669558>.
10. Campbell A.D. A global review of recovery, dilution and draw control in sublevel caving mines. *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2022: 909-926. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/2205_62.
11. Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Барановский К.В. Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021; 4: 15-23. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-4-15-23>.
Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V. Substantiation of the parameters of open stoping mining method with abandonment of unrecoverable pillars. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 4: 15-23. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-4-15-23>. (In Russ.).
12. Смирнов А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С. Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки целиков при отработке пологих рудных тел. *Проблемы недропользования*. 2023; 4 (39): 6-15. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.006>.
Smirnov A.A., Baranovskiy K.V., Dyachkov P.S. Sublevel caving system with frontal ore drawing for excavating pillars of sloping ore deposits. *Problems of subsoil use*. 2023; 4 (39): 6-15. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.006>. (In Russ.).
13. Конурин А.И., Щукин С.А., Неверов С.А., Неверов А.А. Подэтажное обрушение под защитой рудо-породной подушки при переходе от открытых работ к подземной выемке. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2018; 5 (2): 67-74.
Konurin A.I., Shchukin S.A., Neverov S.A., Neverov A.A. Sublevel caving under protection of ore-rocks pad during transition from open works to underground mining. *Fundamental And Applied Issues Of Mining Sciences*. 2018; 5 (2): 67-74. (In Russ.).
14. Brand L., Haider K. Sublevel Shrinkage (SLSh). Mining – A State-of-the-art Review. *BHM Berg- und Huttenmannische Monatshefte*. 2023; 168 (6): 274-280. <https://doi.org/10.1007/s00501-023-01354-3>.
15. Konurin A.I., Shchukin S.A., Neverov S.A., Neverov A.A. Sublevel caving under protection of ore-and-barren rock cushion during transition from open pit to underground mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 262: 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/262/1/012033>.
16. Jakubec J., Lagace D., Boggis B., et al. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018: 73-88. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_03_Jakubec.
17. Khazaei S., Pourrahimian Ya. Mathematical Programming Application in Sublevel Caving Production Scheduling. *Mining*. 2021; 1 (2): 180-191. <https://doi.org/10.3390/mining1020012>.
18. Lapčević V., Torbica S. Numerical investigation of caved rock mass friction and fragmentation change influence on gravity flow formation in sublevel caving. *Minerals*. 2017; 7 (4): 56. <https://doi.org/10.3390/min7040056>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Маликович Гильдеев –
директор по развитию производства ООО «УК ЮГК», г.
Челябинск, Российская Федерация; e-mail: a.gildeev@ugold.ru

Георгий Сергеевич Курчин –
д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет», г. Красноярск, Российская
Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr M. Gildeev –
Director of Production Development, UK UGK LLC,
Chelyabinsk, Russian Federation; e-mail: a.gildeev@ugold.ru

George S. Kurchin –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Сергей Антонович Вохмин –

канд. техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Александр Константинович Кирсанов –

канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Денис Владимирович Бархатов –

аспирант, ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск, Российская Федерация; e-mail: barhatov1997@gmail.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: 11.02.2026

Поступила после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 20.03.2026

Sergei A. Vokhmin –

Cand. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Aleksandr K. Kirsanov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Denis V. Barkhatov –

Postgraduate Student, Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel, Skalisty Mine, Norilsk, Russian Federation; e-mail: barhatov1997@gmail.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.

Article info

Received: 11.02.2026

Revised: 15.03.2026

Accepted: 20.03.2026

Применение профилактической жидкости для борьбы с адгезией опорных поверхностей шагающих экскаваторов

И. И. Демченко¹, Н. А. Попов^{1✉}, О. С. Игнатова¹,
В. И. Брагин¹, Е. А. Антонов²

¹Институт цветных металлов ФГАО ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск,
Российская Федерация

²Балахтинский филиал ООО «Сибуголь» разрез «Большеусьский», с. Большие Сыры, Российская Федерация
✉ marovina@mail.ru

Резюме. Рассмотрена проблема с прилипанием и намерзанием горных масс на рабочие поверхности горной техники. Для борьбы с высокой адгезией рабочих поверхностей горнотранспортного оборудования применяется профилактическая жидкость. Приведены схемы устройства, позволяющего наносить профилактическую жидкость на опорные поверхности шагающих экскаваторов. Выполнено обоснование основных параметров устройства для борьбы с налипанием и намерзанием горных масс на опорные поверхности шагающих экскаваторов, составлена математическая модель для их определения, рассчитаны и представлены в виде таблицы полученные значения массогабаритных параметров для рассматриваемых типоразмеров экскаваторов.

Ключевые слова: шагающий экскаватор, опорные поверхности, адгезия, налипание горной массы, профилактическая жидкость, борьба с адгезией, орошение, очистка рабочих поверхностей

Для цитирования: Демченко И.И., Попов Н.А., Игнатова О.С., Брагин В.И., Антонов Е.А. Применение профилактической жидкости для борьбы с адгезией опорных поверхностей шагающих экскаваторов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 19-25. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-19-25>.

Use of preventive liquid to combat adhesion of support surfaces of stepper excavators

I. I. Demchenko¹, N. A. Popov^{1✉}, O. S. Ignatova¹,
V. I. Bragin¹, E. A. Antonov²

¹Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Sibugol LLC, Balakhta branch, Bolshiesyrsky Mine, Bolshie Siry village, Russian Federation
✉ marovina@mail.ru

Abstract. The problem of rock masses sticking and freezing on the working surfaces of mining equipment has been a common issue for many years. Ignoring these problems often leads to equipment and machinery breakdowns, resulting in costly repairs and financial losses for businesses. In practice, the use of preventive liquid has been widely used to combat high adhesion of working surfaces of mining and transport equipment. For example, in quarrying railway transport, when transporting goods prone to freezing and sticking to the surfaces of gondola cars or dump cars, portal structures are used, designed for spraying preventive liquid “top-down”. In this case, to apply a proven method of adhesion control on the support surfaces of walking excavators (support base and skis), it is necessary to change the spraying direction to “bottom-up”. This paper presents the schemes of the proposed device that allows you to apply a preventive liquid to the support surfaces of walking excavators. The paper provides justification of the main parameters of the device for combating the adhesion and freezing of rock masses on the support surfaces of walking excavators, as well as a mathematical model for their determination. The paper also calculates and presents the mass and dimensional parameters of the excavators in the form of a table.

Keywords: walking excavator, support surfaces, adhesion, adhesion of rock mass, preventive liquid, methods of adhesion control, irrigation, cleaning of work surfaces

For citation: Demchenko I.I., Popov N.A., Ignatova O.S., Bragin V.I., Antonov E.A. Use of preventive liquid to combat adhesion of support surfaces of stepper excavators. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 19-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-19-25>.

Введение

Проблема с прилипанием и намерзанием горных масс на рабочие поверхности горной техники является распространенной. Игнорирование данных проблем зачастую приводит к поломкам техники и оборудования, что влечет за собой дорогостоящий ремонт и финансовые потери предприятий.

На практике для борьбы с высокой адгезией рабочих поверхностей горнотранспортного оборудования используется профилактическая жидкость. Например, на карьерном железнодорожном транспорте при перевозке грузов, склонных к примерзанию и прилипанию к поверхностям полувагонов или думпкаров, применяют порталные сооружения, предназначенные для орошения профилактической жидкостью сверху вниз. Для применения проверенного способа борьбы с адгезией на опорных поверхностях шагающих экскаваторов (опорную базу и лыжи) необходимо изменить направление опрыскивания на снизу вверх.

Цель работы: определение основных количественных и массогабаритных параметров устройства с применением профилактической жидкости для орошения опорных поверхностей шагающих экскаваторов различных типоразмеров.

Методы исследований

В ходе исследований, проведенных в Институте цветных металлов Сибирского федерального университета, методом прямого измерения силы отрыва горных масс от различных конструкционных материалов оценивалась эффективность выбранной профилактической жидкости. Испытания проводились в различных температурных диапазонах с фиксацией усилия отрыва посредством тензометрических датчиков на специальной установке. Результаты подтвердили высокую эффективность профилактической жидкости во всем исследуемом температурном интервале при различной влажности грунта.

Результаты исследований

В данной работе приведены схемы устройства, позволяющего наносить профилактическую жидкость на опорные поверхности шагающих экскаваторов.

Опорная база шагающего экскаватора представляет собой несущий элемент конструкции, на который опирается машина при работе или передвижении. Она служит для распределения нагрузки на подошву уступа, а также установки на нее поворотного устройства. Представляет собой круглую сварную металлическую конструкцию, состоящую из верхнего и нижнего настилов, кольцевых и радиальных диафрагм (рис. 1).

Наличие пустот позволяет разместить оборудование для нанесения профилактической жидкости, состоящее из емкости для профилактической жидкости, насоса, электродвигателя, трубопроводов, форсунок с направлением опрыскивания вверх. Для этого на нижнем настиле опорной базы выполняются отверстия, которые с внутренней стороны опорной базы закрыты стаканами (рис. 2), снабженными полым штоком с подпружиненной крышкой, на обратной стороне которой размещены форсунки с возможностью опрыскивания профилактической жидкости вверх [1–5].



Рис. 1. Фрагмент опорной базы шагающего экскаватора:
1 – верхний настил базы; 2 – нижний настил базы /
Fig. 1. Fragment of the walking excavator support base:
1 – upper base deck; 2 – lower base deck

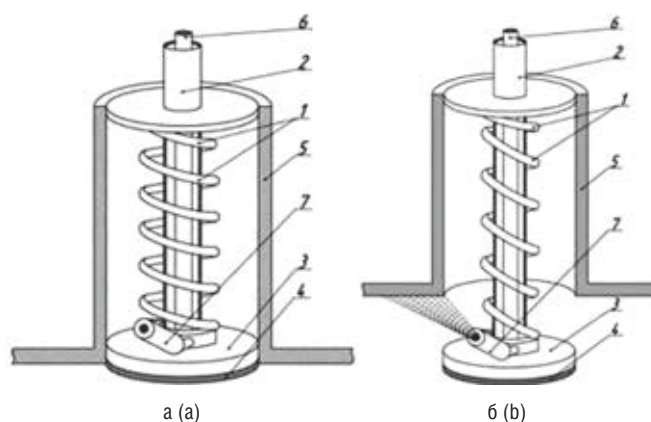


Рис. 2. Вид стаканов в разрезе при задвинутом штоке (а) и при выдвинутом штоке (б): 1 – пружина;
2 – полый шток; 3 – крышка; 4 – резиновая накладка; 5 – стакан; 6 – трубки подачи жидкости; 7 – форсунка /
Fig. 2. View of the cups in section with the stem retracted (a), with the stem extended (b): 1 – spring; 2 – hollow stem; 3 – cover; 4 – rubber cover; 5 – cup; 6 – liquid supply tubes; 7 – nozzle

Работа устройства

До момента, когда экскаватор начинает движение, его лыжи находятся в поднятом положении, а опорная база остается на подошве уступа. При начале движения лыжи опускаются, а опорная база поднимается. При этом пружина 1, расположенная на полом штоке 2, распрямляется и тем самым выталкивает соединенную со штоком крышку 3. Крышка выполнена в форме круга и имеет резиновую накладку 4 со стороны контакта с грунтом для уменьшения риска налипания и намерзания породы в области стыка со стаканом 5. После того как крышка оказалась в выдвинутом положении, машинист экскаватора включает насос для подачи профилактической жидкости (РПС-67, КОС и др.) по трубопроводу к трубке 6, расположенной внутри штока. После чего форсунка 7 распыляет поступившую профилактическую жидкость под давлением на опорную поверхность в виде водовоздушной смеси (рис. 2). Для предотвращения избыточного расхода жидкости перед форсункой предусмотрен обратный клапан, который при отсутствии давления в системе будет закрываться.

Закончив распыление, машинист прекращает подачу

жидкости путем выключения насоса. Далее происходит передвижение и опускание экскаватора и подъем лыж в исходное положение. При опускании сжимается пружина в стакане расположенного на опорной базе, а шток в свою очередь проходит через отверстие, расположенное в верхней части стакана. Опорная база, опускаясь на грунт, закрывает крышкой отверстие в стакане. Устройство, расположенное в лыжах экскаватора, прodelывает аналогичные операции, что и на опорной базе [6–9].

Обоснование основных параметров устройства

Для расчета основных параметров учитываются площади опорных поверхностей шагающих экскаваторов, а также кинематическая вязкость профилактической жидкости. Зная площади опорных поверхностей шагающих экскаваторов разных типоразмеров, определим количество стаканов и тип форсунок для полного орошения днища и лыж, а также всю сопутствующую арматуру для обеспечения работы устройства, к которому относят трубопровод, насос для подкачки жидкости, электродвигатель для работы насоса, а также бак для профилактической жидкости. Также для расчетов общей массы конструкции учтем массу дополнительного оборудования, а именно полого штока, пружины и крышки для затвора отверстия.

Определение основных параметров устройства

При оборудовании опорных поверхностей шагающих экскаваторов предлагаемым устройством первостепенное значение имеет определение характеристик форсунки. Для выполнения данной задачи была выбрана форсунка с полноконусным факелом распыления. Преимуществом таких форсунок является широкий диапазон угла распыления и рабочего давления, что способствует регулированию процесса орошения, а также сравнительно небольшой расход при непрерывном использовании.

Для максимально эффективного использования форсунок был выбран угол распыления = 120°, а использование четырех форсунок вместо трех позволило достичь перекрытия периферийных зон опрыскивания (заштрихованная область) опорной базы профилактической жидкостью (рис. 3).

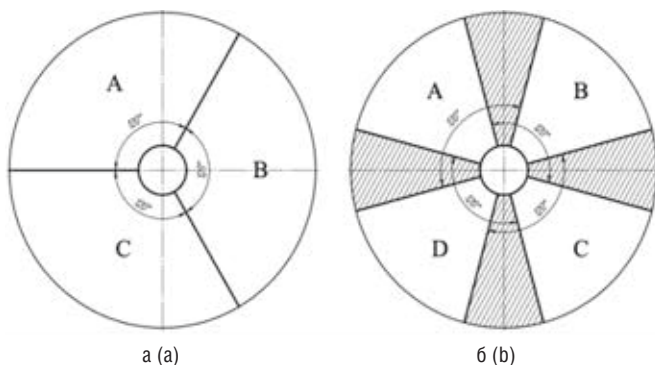


Рис. 3. Схемы распыления при угле = 120° тремя (а) и четырьмя (б) форсунками. А, В, С, D – секторы покрытия профилактической жидкости / Fig. 3. Spray patterns at an angle of 120° with three (a) and four (b) nozzles. A, B, C, and D – are the coverage sectors of the preventive liquid

Количество стаканов на опорной базе определялось графически, применялось параллельно-последовательное соединение форсунок с окружным расположением (рис. 4).

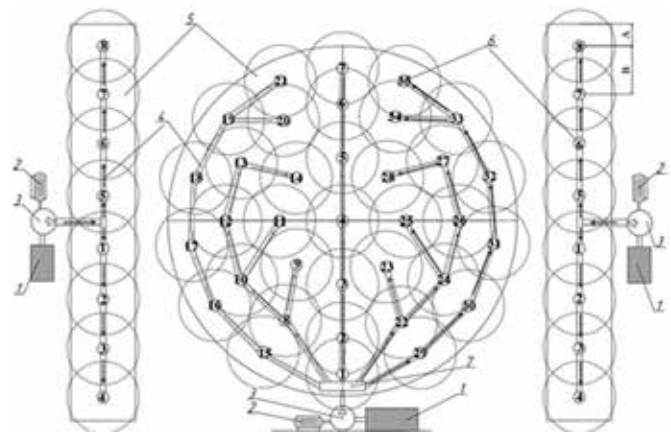


Рис. 4. Окружная с разными диаметрами схема размещения стаканов с зонами распыления для ЭШ-10/70: 1 – бак для жидкости; 2 – электродвигатель; 3 – насос; 4 – трубопровод; 5 – зоны распыления; 6 – стаканы с форсунками; 7 – распределитель; А – расстояние крайнего стакана от кромки лыжи = 60 см; В – расстояние между стаканами В = 140 см /

Fig. 4. Circular layout of cups with spray zones for the ESH-10/70: 1 – liquid tank; 2 – electric motor; 3 – pump; 4 – pipeline; 5 – spray zones; 6 – cups with nozzles; 7 – distributor; A – distance of the outermost cup from the ski edge = 60 cm; B – distance between cups B = 140 cm

Для примера представлен на схеме экскаватор ЭШ-10/70. Отметим, что расположение стаканов на лыжах будет рядным, также параллельно-последовательным. На экскаваторах ЭШ 20/90 и ЭШ 40/85 ввиду большей ширины лыжи стаканы расположены в два ряда. Также каждая лыжа экскаватора снабжена собственным оборудованием для опрыскивания, включающим двигатель, насос и бак.

Для определения расхода профилактической жидкости сначала рассчитаем общее количество форсунок, установленных в стаканах, из расчета четыре форсунки на стакан:

$$y = 4 \sum_{i=1}^{a=\max} n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_s, \quad (1)$$

где y – количество форсунок на опорной базе/лыже шагающего экскаватора, шт.;

a – максимальное количество стаканов на опорной базе/лыже, шт.;

n_i – количество стаканов на опорной поверхности, шт.

Определив количество форсунок, находим расход жидкости

$$Q = q \cdot n, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где Q – расход форсунки = 0,072, м³/ч;

n – общее количество форсунок на опорной поверхности, шт.

Так как расход жидкости остается неизменным для выбранного типа форсунок, диаметр трубопровода будет регулироваться за счет изменений скорости потока жидкости. Для того чтобы уменьшить диаметр труб, а соответственно, значительно снизить вес, необходимо увеличивать скорость потока жидкости, что в свою очередь влечет за собой потери давления в системе. Скорость движения жидкости по трубопроводу для разных моделей экскаваторов, а также в зависимости от типа опорной поверхности (лыжи или опорная база) будет приниматься от 0,5 до 2,5 м/с.

Расчет диаметра трубопровода проводим по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot v}}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где Q – расход жидкости, м³/ч;

v – скорость движения жидкости, м/с.

Рассчитав внутренний диаметр трубы, принимаем трубу необходимого диаметра и нужной толщины стенки по ГОСТ-32528-2013.

После определения диаметров трубопровода необходимо произвести расчет мощности насоса по формуле

$$N = \frac{P \cdot Q}{600 \cdot \eta}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где P – необходимое давление, бар;

Q – расход жидкости, м³/ч;

$\eta = 0,8$ – КПД насоса.

Рабочее давление в таком случае необходимо принять 10,5 бар. Давление выбирается с резервом = 5 % для того, чтобы нивелировать потери в трубопроводе.

Взяв за основу время опрыскивания, равную двум секундам, а также зная расход жидкости, потребляемый форсунками, выбирается бак необходимого объема как для лыж, так и для опорной базы с возможностью дозаправки в процессе работы техники, если жидкость закончится в течение смены. Высота бака внутри опорной базы ограничивается ее внутренней высотой, для увеличения объема возможно размещение нескольких сообщающихся баков в смежных секторах.

Объем расходуемой профилактической жидкости рассмотрим на примере ЭШ-10/70. Зная среднюю скорость движения экскаватора и длину шага, находим количество шагов за час передвижения по формуле

$$N_{\text{ш}} = \frac{S}{l}, \quad (5)$$

где S – расстояние передвижения экскаватора за час работы, м;

l – длина шага экскаватора, м.

Зная количество шагов экскаватора, можно найти общее время опрыскивания опорных поверхностей за час передвижения из расчета 2 с/шаг экскаватора. По техническим характеристикам производителя, расход форсунки составляет 0,02 л/сек или же 1,2 л/мин.

Исходя из этого значения находим расход жидкости для одной форсунки за один час движения экскаватора по формуле

$$q_1 = q \cdot t, \text{ л}, \quad (6)$$

где q – расход форсунки = 1,2 л/мин.;

t – время работы форсунки за час движения экскаватора, мин.

Общее количество жидкости для опорной базы и лыж находим по формуле

$$Q = \frac{q_1 \cdot n_{\phi}}{1000}, \text{ м}^3, \quad (7)$$

где q_1 – расход жидкости форсунки на час передвижения, $q_1 = 5,28$ л;

n_{ϕ} – количество форсунок на опорной базе/лыже экскаватора, шт.

Получив необходимые значения по расходу профилактической жидкости, можно рассчитать емкости для ее хранения. Бак будет выполняться индивидуально для каждой опорной базы и лыжи экскаваторов. Высота емкости ограничивается высотой опорной рамы. На лыжах прямоугольная форма емкости ограничивается шириной лыжи и свободным пространством длины лыжи.

Анализируя схемы трубопроводов, заметим, что их длины в окружной схеме равны либо диаметру $2R$ либо $2R - \Delta$, где Δ – максимальное расстояние наложения зон распыления от форсунок соседних стаканов (рис. 5).

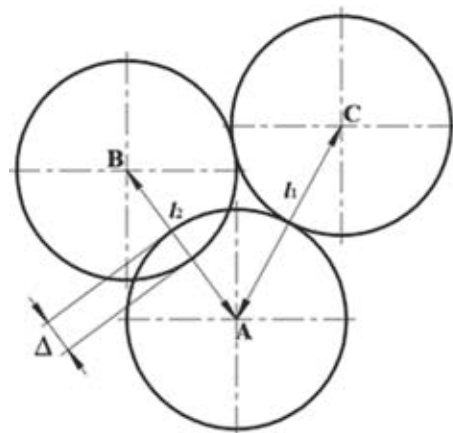


Рис. 5. Схема для расчета длины отрезков трубопровода между стаканами в окружной схеме /

Fig. 5. Diagram for calculating the length of pipeline sections between cups in a circular diagram

В этом случае длину отрезков трубопровода между стаканами для окружной и квадратной схем найдем по формулам

$$AC = l_1 = 2R, \text{ м}, \quad (8)$$

где $AC (l_1)$ – расстояние между стаканами, м;

R – радиус зоны орошения, м.

$$AB = l_2 = 2R - \Delta, \text{ м}, \quad (9)$$

где $AB (l_2)$ – расстояние между стаканами, м;

R – радиус зоны орошения, м;

Δ – расстояние наложения зон = 0,4 м.

Для расчета общей длины трубопровода необходимо определить количественный показатель отрезков l_1 и l_2 для каждого из рассматриваемых типоразмеров экскаваторов, ориентируясь на представленные выше схемы, по формуле

$$L = \sum_{i=1}^{n=\max} l_1 + \sum_{i=1}^{n=\max} l_2, \text{ м}, \quad (10)$$

где n – количество стаканов, шт.;

l_1 – длина отрезка без учета длины наложения Δ , м;

l_2 – длина отрезка с учетом длины наложения Δ , м.

Заключительным этапом становится расчет массы вспомогательных элементов, расположенных на лыжах и опорной базе. Для этого достаточно рассчитать массу элементов, находящихся в одном стакане, и умножить на количество стаканов, находящихся на опорных поверхностях рассматриваемых моделей экскаваторов.

Массу элементов m , находящихся в одном стакане, определим по формуле

$$m = 2m_1 + m_2 + m_3 + m_4, \text{ кг}, \quad (11)$$

где m_1 – масса крышки = 0,4 кг;

m_2 – масса штока = 0,92 кг;

m_3 – масса пружины = 0,5 кг;

m_4 – масса стакана = 0,88 кг.

Полученные значения для каждого из параметров представлены в таблице.

Таблица / Table

**Основные параметры устройства
для рассматриваемых типоразмеров экскаватора /
Main device parameters for the excavator sizes under consideration**

Параметр	ЭШ-6/45	ЭШ-10/70	ЭШ-11/75	ЭШ-20/90	ЭШ-40/85
Количество форсунок на одной / двух лыжах	20 / 40	32 / 64	32 / 64	64 / 128	112 / 224
Количество форсунок на опорной базе	84	140	152	248	368
Общее количество форсунок	124	204	216	376	592
Суммарный расход жидкости на опорные поверхности, м³/ч	8,93	14,68	15,55	27,06	42,5
Скорость передвижения, м/с	0,133	0,055	0,055	0,023	0,014
Длина шага, м	1,5	1,5	1,5	2	2,4
Количество шагов в час	320	132	132	40	21
Расход жидкости на опорной базе при окружном варианте, м³/ч	1,079	0,740	0,803	0,397	0,309
Расход жидкости на одной лыже, м³/ч	0,257	0,169	0,169	0,103	0,094
Суммарный объем жидкости, м³	1,593	0,972	1,12	0,648	0,514

Продолжение таблицы / Continuation of the table

Параметр	ЭШ-6/45	ЭШ-10/70	ЭШ-11/75	ЭШ-20/90	ЭШ-40/85
Длина трубопровода опорной базы, м	33	58,2	60,8	103,1	155,05
Масса трубопровода опорной базы, кг	124,41	232,22	242,6	495,9	745,8
Общая масса трубопровода, кг	142,61	275,62	286	649,72	904,02
Масса вспомогательных элементов опорной базы, кг	65,1	108,5	117,8	192,2	285,2
Общая масса конструкции, кг	238,71	433,72	453,4	941,12	1362,82

Общая масса конструкции рассчитана без учета массы электродвигателя и насоса, так как они могут быть заменены на аналоги, отчего будет изменяться и общая масса предлагаемого устройства. Емкость бака для профилактической жидкости может быть увеличена за счет размещения в соседних секторах опорной базы дополнительных сообщающихся емкостей. Поэтому конечная масса устройства будет варьироваться в зависимости от установленных на экскаваторе электродвигателя и насоса, а также параметрами емкостей с профилактической жидкостью [10–15].

Таким образом, определены основные количественные и массогабаритные параметры устройства с применением профилактической жидкости для орошения опорных поверхностей шагающих экскаваторов различных типоразмеров.

Заключение

В данной работе для борьбы с высокой адгезией опорных поверхностей шагающих экскаваторов предложено устройство по орошению профилактической жидкостью.

Представлены схемы устройства с применением форсунок и обоснованы основные параметры устройства. Рассчитаны количественные характеристики и установлены зависимости расхода материала для рассматриваемых моделей шагающих экскаваторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Rahimi B., Sharifzadeh M., Feng X.-T. Ground behaviour analysis, support system design and construction strategies in deep hard rock mining – Justified in Western Australian's mines. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*. 2020; 12 (1): 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.01.006>.
2. Gell E.M., Walley S.M., Braithwaite C.H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks. *Rock Mechanics and Rock engineering*. 2019; 3: 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01787-8>.
3. Киргизов Р.С., Минеев Д.А. Обзор полимерных покрытий для снижения адгезии грунтов к рабочим органам машин. *Аспирант*. 2015; 9: 36-39.
Kirgizov R.S., Mineev D.A. Review of Polymer Coatings for Reducing Soil Adhesion to Machine Components. *Graduate Student*. 2015; 9: 36-39. (In Russ.).
4. Ismael M., Abdelghafar K., Sholqamy M., Elkarmoty M. Performance prediction of hydraulic breakers in excavation of a rock mass. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*. 2021; 36 (4): 107-119. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.4.9>.
5. Корнилов С.В., Кравчук И.Л., Пикалов В.А. О прогнозе возникновения опасных производственных ситуаций на угольных разрезах. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2024; 6: 59-71. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2024-6-59-71>.
Kornilov S.V., Kravchuk I.L., and Pikalov V.A. On the Prediction of Dangerous Production Situations at Coal Deposits. *News of Higher Education Institutions. Mining Journal*. 2024; 6: 59-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2024-6-59-71>.
6. Суслов Н.М., Суслов Д.Н. Совершенствование шагающего ходового оборудования с гидроприводом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015; 8: 90-94.
Suslov N.M., Suslov D.N. Improvement of Stepping Walking Equipment with a Hydraulic Drive. *News of Higher Education Institutions. Mining Journal*. 2015; 8: 90-94. (In Russ.).

7. Авт. свид. 1081299 СССР, МПК E02F 9/04. Шагающий экскаватор / Э.П. Жиронкин, Л.Л. Сырнева, Ю.В. Лавренко. Заявка №3471206 от 04.06.82; опубл. 23.03.1984, Бюл. № 11.
A.S. 1081299 USSR, IPC E02F 9/04. Walking excavator / E.P. Zhironkin, L.L. Syrneva, Yu.V. Lavrenko. Application No. 3471206 dated 04.06.82; published on 23.03.1984, Bulletin No. 11. (In Russ.).
8. Подэрни Р.Ю. Шагающие драглайны на открытых разработках. Москва, 1980: 70.
Poderny R.Yu. Walking Draglines in Open-Pit Mining. Moscow, 1980: 70.
9. Дунаевская М.П. Разработка и обоснование эффективных средств защиты емкостей транспортного и перегрузочного оборудования от прилипания и примерзания горной массы. Москва, 1984: 17.
Dunaevskaya M.P. Development and substantiation of effective means of protecting the containers of transport and handling equipment from sticking and freezing of rock mass. Moscow, 1984: 17. (In Russ.).
10. Демченко И.И., Васильев С.Б., Косолапов А.И. Способы и средства борьбы с налипанием и намерзанием породы на карьерных автосамосвалах: монография. Москва, 2008: 164.
Demchenko I.I., Vasilyev S.B., Kosolapov A.I. Methods and Means of Combating Adherence and Freezing of Rock on Quarry Dump Trucks: Monograph. Moscow, 2008: 164. (In Russ.).
11. Лагунова Ю.А., Комиссаров А.П., Шестаков В.С. Проектирование карьерных экскаваторов. Москва, 2017: 228.
Lagunova Yu.A., Komissarov A.P., and Shestakov V.S. Design of Quarry Excavators. Moscow, 2017: 228. (In Russ.).
12. Авт. свид. 1407874 СССР. Способ предотвращения налипания и намерзания горной массы на ленту конвейера и устройство для его осуществления / В.И. Мочалов, С.А. Гончаров, А.Ф. Алексеев, Л.Д. Гольдис, А.М. Смородов, А.В. Сытник, Г.А. Янченко, Т.И. Янченко. Заявка № 3986504 от 10.12.85; опубл. 07.07.1988. Бюл. № 25.
Autor. svid. 1407874 USSR. A method for preventing the adhesion and freezing of rock mass on a conveyor belt and a device for implementing it / V.I. Mochalov, S.A. Goncharov, A.F. Alekseev, L.D. Goldis, A.M. Smorodov, A.V. Sytnik, G.A. Yanchenko, and T.I. Yanchenko. Application No. 3986504 dated 10.12.85; published on 07.07.1988. Bulletin No. 25. (In Russ.).
13. Патент 2828513 РФ. Устройство для предотвращения налипания и намерзания горной массы к днищу опорной базы и лыжам шагающего экскаватора / И.И. Демченко, Д.Ю. Крицкий, А.И. Демченко, Н.А. Попов. Заявка № 2024105439 от 04.03.2024; опубл. 14.10.2024. Бюл. № 29.
Patent 2828513 of the Russian Federation. Device for preventing sticking and freezing of rock mass to the bottom of the support base and skis of a walking excavator / I.I. Demchenko, D.Yu. Kritsky, A.I. Demchenko, N.A. Popov. Application No. 2024105439 dated 04.03.2024; published 14.10.2024. Bulletin No. 29.
14. Груздев А.В., Бойко Г.Х. Шагающие экскаваторы-драглайны производства корпорации ОМЗ. Горная промышленность. 2003; 3: 16–20.
Gruzdev A.V., Boyko G.Kh. Walking dragline excavators manufactured by the OMZ Corporation. Mining Industry. 2003; 3: 16-20. (In Russ.).
15. Суслов Н.М. Эксплуатационные характеристики существующих шагающих механизмов одноковшовых экскаваторов. Горное оборудование и электромеханика. 2013; 8: 11-14.
Suslov N.M. Operating Characteristics of Existing Walking Mechanisms of Single-Bucket Excavators. Mining Equipment and Electromechanics. 2013; 8: 11-14. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь Иванович Демченко –

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов, Сибирский федеральный университет, институт цветных металлов, г. Красноярск, Российская Федерация

Никита Анатольевич Попов –

аспирант, ассистент кафедры горных машин и комплексов, Сибирский федеральный университет, институт цветных металлов, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: marovina@mail.ru

Ольга Сергеевна Игнатова –

кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и комплексов Сибирский федеральный университет, институт цветных металлов, г. Красноярск, Российская Федерация

Виктор Игоревич Брагин –

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, Сибирский федеральный университет, институт цветных металлов, г. Красноярск, Российская Федерация

Егор Анатольевич Антонов –

заместитель главного механика, Балахтинский филиал ООО «Сибуголь» разрез «Большеесырский», с. Большие Сыры, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Igor I. Demchenko –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals, Krasnoyarsk, Russian Federation

Nikita A. Popov –

Postgraduate Student, Assistant of the Department of Mining Machines and Complexes, Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: marovina@mail.ru

Olga S. Ignatova –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals, Krasnoyarsk, Russian Federation

Viktor I. Bragin –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mineral Processing, Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals, Krasnoyarsk, Russian Federation

Egor A. Antonov –

Deputy Chief Mechanic, Balakhtinsky Branch of Sibugol LLC, Bolshosirsky Mine, Krasnoyarsk region, Balakhtinsky District, Bolshie Siry village, Russian Federation

Критерии авторства:

Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.03.2026

Поступила после рецензирования: 29.03.2026

Принята к публикации: 05.04.2026

Contribution:

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

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 13.03.2026

Revised: 29.03.2026

Accepted: 05.04.2026

Исследование смесителя с геликоидной камерой для горной промышленности

А. С. Морин[✉], Э. Ш. Мусазаде, О. С. Игнатова, В. И. Брагин

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет (Институт цветных металлов и материаловедения)»,
г. Красноярск, Российская Федерация

✉ AMorin@sfu-kras.ru

Резюме. Приведены результаты разработки комбинированной сборно-модульной конструкции смесительного устройства геликоидного типа, обеспечивающего перераспределение энергии потока с осевой на тангенциальную составляющую без существенного роста гидравлических потерь. На основе сравнения статического и динамического варианта конструкций смесителя проведено исследование путем CFD-моделирования двухфазной системы с использованием уравнений Навье – Стокса и турбулентной модели Буссинеска. Выполнены расчеты коэффициента гидравлического сопротивления и удельных энергетических затрат. Результаты гидродинамического моделирования показывают, что динамическая компоновка обеспечивает формирование устойчивого закрученного потока без застойных зон и локального недосмешения. Коэффициент гидравлического сопротивления снижается до 0,613 по сравнению с 0,986 для статического варианта, а энергопотребление уменьшается с 30,1 до 25,5 кВт. Полученные результаты подтверждают перспективность применения устройства в процессах подготовки пульпы, реагентных растворов и эмульсионных систем горной промышленности.

Ключевые слова: смеситель, роторный модуль, гидродинамическое моделирование, CFD, динамический завихритель

Для цитирования: Морин А.С., Мусазаде Э.Ш., Игнатова О.С., Брагин В.И. Исследование смесителя с геликоидной камерой для горной промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 26-32. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-26-32>.

Research on helicoid module mixer for mining industry

A. S. Morin[✉], E. Sh. Musazade, O. S. Ignatova, V. I. Bragin

Siberian Federal University (Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science), Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ AMorin@sfu-kras.ru

Abstract. Mixing in the mining industry plays a key role in the preparation of pulps, backfill mixtures, and reagent solutions. The quality of mixing determines the completeness of physical and chemical processes, the uniformity of component distribution, and the stability of system properties. Effective mixing reduces reagent consumption, increases the recovery of useful components, and ensures the reliability of process equipment. To improve the energy efficiency and reliability of mixing equipment under conditions of high abrasiveness, variable rheology, and unstable process fluid transport conditions, a new combined modular design of a helical mixing device has been proposed. This design redistributes flow energy from the axial to the tangential component without significantly increasing hydraulic losses. A comparison of static and dynamic designs was used to study the two-phase system using CFD modeling using the Navier – Stokes equations and the Boussinesq turbulent model. Calculations of the hydraulic resistance coefficient and specific energy consumption were also performed. Hydrodynamic modeling results show that the dynamic configuration ensures the formation of a stable swirling flow without stagnation zones or localized undermixing. The hydraulic resistance coefficient is reduced to 0.613 compared to 0.986 for the static configuration, and power consumption is reduced from 30.1 to 25.5 kW. These results confirm the device's potential for use in the preparation of slurries, reagent solutions, and emulsion systems in the mining industry.

Keywords: mixer, rotor module, computational fluid dynamics (CFD) simulation, dynamic swirler

For citation: Morin A.S., Musazade E.Sh., Ignatova O.S., Bragin V.I. Research on helicoid module mixer for mining industry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 26-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-26-32>.

Введение

Современное горнодобывающее производство характеризуется высокой степенью интенсификации и усложнением технологических схем переработки минерального сырья [1]. В этих условиях особую роль играет совершенствование оборудования, обеспечивающего подготовку пульп, растворов и закладочных смесей, среди которого устройства для перемешивания материалов (смесители) занимают одно из ключевых мест [2, 3].

Смесители материалов являются критическим «сквозным» звеном, определяющим скорость и полноту технологических схем путем обеспечения выравнивания концентраций реагентов, формирования и поддержания дисперсий, управления структурой флоккул и предотвращения локальных зон недосмешения, которые ведут к росту расхода реагентов, ухудшению осаждения и фильтрации, повышению износа и ухудшению надежности работы всего технологического комплекса [4–6]. При этом реальные промышленные режимы характеризуются высокой абразивностью, переменной реологией и колебаниями расхода, поэтому задача выбора и обоснования устройства для перемешивания материалов имеет одновременно технологическую и эксплуатационно-экономическую природу.

Статические смесители широко применяются в непрерывных технологических процессах горной и перерабатывающей промышленности, где востребованы энергоэффективность и надежность оборудования [7]. Их можно классифицировать по типу применяемых завихряющих модулей на смесители на основе пластинчатых и гофрированных вставок, а также спиральных и винтовых элементов. По сравнению с приводными аналогами они характеризуются пониженным энергопотреблением и минимальными затратами на техническое обслуживание [8].

Однако для ряда задач их использование сопровождается недостаточно эффективным преобразованием энергии потока, значительным перекрытием проходного сечения и, как следствие, ростом гидравлических сопротивлений и потерей напора. Кроме того, конструктивные особенности статических смесителей ограничивают их функциональные возможности [9]. В связи с этим для специфических условий горной промышленности требуется конструкция смесителя, свободная от указанных недостатков.

Выбор направления исследований

При изучении вышеизложенной проблемы, а также учитывая множество существующих конструкций смесителей на сегодняшний день, в Сибирском федеральном университете была разработана комбинированная сборно-модульная конструкция геликоидного смесительного устройства на базе завихрителя потока¹ и роторного модуля².

Разработанное устройство (рис. 1) состоит из трех основных составляющих частей: камеры впуска дисперсионной

среды 1, устройства ввода дисперсной фазы 2 и камеры смешения 3.

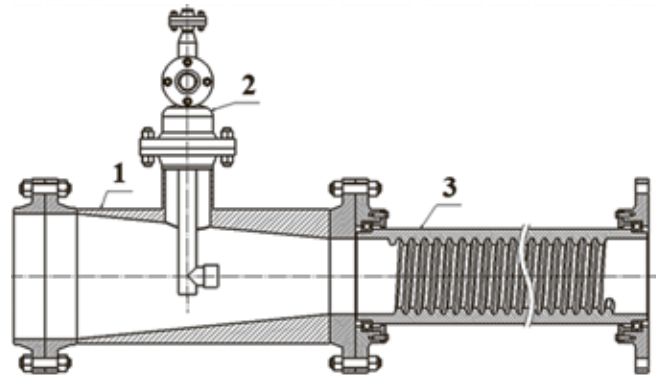


Рис. 1. Смесительное устройство с роторным модулем: 1 – камера впуска; 2 – устройство ввода; 3 – роторный модуль /
Fig. 1. Mixing device with a rotary module: 1 – inlet chamber; 2 – input device; 3 – rotary module

Отличием от стандартных устройств является особая конструкция камеры смешения 3, представляющая собой гидравлическую камеру с внутренним геликоидным рельефом, установленную в подшипниках с возможностью вращения вокруг оси. Такого рода гидравлические камеры, помимо смесителей, могут применяться в конструкции других устройств, в частности расходомеров [10], и кавитационных генераторах [11]. Конструкция обладает модульным принципом исполнения, что позволяет адаптировать ее под различные расходы и физико-химические свойства обрабатываемых сред без принципиального изменения технологической схемы [12].

Геликоидный смеситель (рис. 1) работает следующим образом. В первый блок (трубу с конусным профилем) поступает основная жидкость, которую необходимо смешать с реагентом или любой другой жидкостью, подаваемой в устройстве ввода 2. В камере смешения 3 осуществляется механическое воздействие на структуру смешиваемых сред посредством интенсивного вращения.

Цель исследований: анализ технологических возможностей нового геликоидного смесительного устройства, предназначенного для применения в технологических процессах горной промышленности, применительно к процессу гомогенизации системы жидкость – жидкость.

Идея работы: проведение сравнительного анализа гидродинамических характеристик потока и энергопотребление при работе с жидкими средами при статичной и динамичной вариантах компоновок.

Материал и методы исследования

Согласно опытным исследованиям Л. М. Милштейна и другим [9], каждая конструкция завихряющего элемента имеет отличные параметры и характер влияния на поток. В работе представлены экспериментальные кривые для расчета гидравлических сопротивлений для различного вида смесителей (рис. 2).

На основании экспериментальных данных были определены уравнения регрессии в экспоненциальном виде для четырех конструкций завихряющих элементов.

Расчет средних значений функций на заданных промежутках проведен согласно

¹Патент № 2695735 С1 Российская Федерация, МПК F15D 1/12, E21B 41/00. № 2018143155: заявл. 05.12.2018; опубл. 25.07.2019 / К.А. Башмур, Э.А. Петровский; заявитель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

²Патент № 2781027 С1 Российская Федерация, МПК F03B 13/00, E21B 41/00, E21B 37/00. № 2022112346: заявл. 04.05.2022; опубл. 04.10.2022 / К.А. Башмур, Э.Ш. Мусазаде; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \Rightarrow \int_a^b f(x) dx. \quad (1)$$

Средние значения различных профилей представлены на диаграмме (рис. 2).

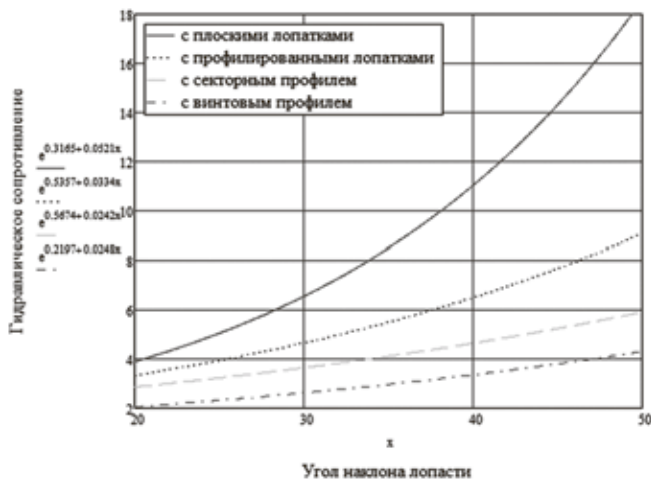


Рис. 2. Диаграмма средних значений гидравлических сопротивлений для различных конструкций /
Fig. 2. Diagram of average values of hydraulic resistance for different designs

Согласно рисунку 2, показатель гидравлических сопротивлений у осевого модуля с винтовым профилем значительно ниже других профилей завихряющего модуля. Это связано с тем, что винтовой профиль создает меньше гидравлических сопротивлений. Также к достоинствам винтового профиля можно отнести то, что данные конструкции не требуют подвода электроэнергии, они безопасны, долговечны за счет минимальной номенклатуры задействованных элементов, а также в них отсутствует возможность облитерации каналов механическими примесями в отличие от решетчатых и пластинчатых модулей. Однако, несмотря на все достоинства винтового профиля, является очевидным, что наличие геликоидной вставки в трубе без дополнительного воздействия на поток создаст слабую степень диспергирования и недостаточное перемешивание.

В отличие от статических смесительных устройств в геликоидном смесителе элементы, обеспечивающие взаимодействие с потоком, размещены по периферии – на внутренней поверхности камеры смешения.

Такая конструктивная схема принципиально изменяет характер гидродинамических процессов.

Во-первых, обеспечивается сохранение требуемой мощности потока, определяемой произведением перепада давления на объемный расход, поскольку рабочий объем камеры увеличивается, а суммарные гидравлические сопротивления снижаются.

Во-вторых, энергия потока расходуется преимущественно не на его торможение, как это характерно для статических элементов, а на приведение во вращение камеры смешения с геликоидальным рельефом. Это приводит к формированию выраженных тангенциальных и радиальных составляющих скорости, обеспечивающих переориентацию направлений движения потока и интенсификацию процессов деформации, диспергирования и перемешивания фаз.

В-третьих, совокупное действие вращения камеры и движения потока создает синергетический эффект, сопровожда-

ющийся увеличением центробежных и гравитационных сил, воздействующих на дисперсную фазу, что способствует более эффективному перераспределению компонентов системы.

В-четвертых, эксплуатация оборудования во вращающемся режиме снижает вероятность образования и закрепления отложений на рабочих поверхностях. Это обусловлено уменьшением застойных зон, наличием сдвиговых напряжений и периодической сменой направления локальных скоростей, что препятствует зарождению и росту центров кристаллизации.

Таким образом, в разработанной модели происходит повышение однородности компонентов при их смешении, а также увеличивается дисперсность вводимой жидкости.

Для оценки течения потоков было произведено гидродинамическое моделирование (CFD) двухфазной системы в SolidWorks Flow Simulation.

Исходные параметры для моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры для исследования /
Parameters for research

Параметр	Значение
Давление, МПа	1,33
Внутренний диаметр, мм	200
Внешний диаметр, мм	299
Количество витков, шт.	19
Объемный расход, м³/с	0,167
Плотность дисперсионной среды, кг/м³	820
Плотность дисперсной фазы, кг/м³	997

Программный комплекс SolidWorks относится к пакетам 3D-моделирования среднего уровня. Входящий в его состав прикладной модуль гидродинамического моделирования Flow Simulation сочетает высокоуровневую функциональность с точностью и простотой пользования. Он позволяет решать целый комплекс задач, используя при этом математическую модель Навье – Стокса движения вязкой по Ньютону жидкости [13].

Уравнение сохранения массы выражается так [14]:

$$\frac{d}{dx_i} (\bar{v}_i) = 0. \quad (2)$$

Уравнение сохранения импульса с учетом стационарного течения и инерционной системы [16]:

$$\rho \bar{v}_i \frac{d\bar{v}_i}{dx_j} = -\frac{d\bar{p}_i}{dx_j} + \mu \frac{d^2 \bar{v}_i}{dx_j^2} - \rho \frac{d}{dx_j} \bar{v}_i \bar{v}_j + \rho \bar{g}. \quad (3)$$

В целом явление турбулентности и вязкий тензор группируются. Таким образом, общий вид тензора имеет вид [16]:

$$\tau_{gij} = -\rho \bar{v}_i \bar{v}_j + \mu \left(\frac{d\bar{v}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{v}_j}{dx_i} \right). \quad (4)$$

Тензор Рейнольдса τ_i можно смоделировать, используя гипотезу Буссинеска, представленную в турбулентной вязкости μ_t [17]:

$$-\rho \bar{v}_i \bar{v}_j = \mu_t \left(\frac{d\bar{v}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{v}_j}{dx_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{dv_k}{dx_k} \right) \sigma_{ij}. \quad (5)$$

Расчетная сетка используемой при моделировании вычислительной области для предложенной конструкции смесителя представлена на рисунке 3 (см. цв. вклейку на стр. 30).

В расчетной сетке область геликоидного рельефа имеет высокую степень дробления, так как эта конструктивная часть является наиболее значимой и сложной в данной модели, а также требует получения наиболее точных результатов расчетов. Полученная сеточная модель содержит 285 820 элементов.

Результаты и их обсуждение

По результатам исследования была получена эпюра течения скорости в области моделирования (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 30).

Из эпюры распределения скорости видно, что происходит перераспределение энергии в смесителе с осевой скорости на окружную. Другими словами, центральному потоку передается окружная составляющая и искусственно создается завихрение, что является главной особенностью смесительных устройств, влияющих на качество перемешивания.

В результате моделирования также была построена эпюра завихренности потока на выходе из камеры смешения (рис. 5). Линии завихренности имеют плавный дугообразный профиль, скругляющийся к центру. Помимо этого, на выходе из камеры смешения отсутствуют зоны недосмешения и зоны с нарушениями траектории потока, что говорит об эффективном и последовательном вовлечении слоев, начиная с граничного.

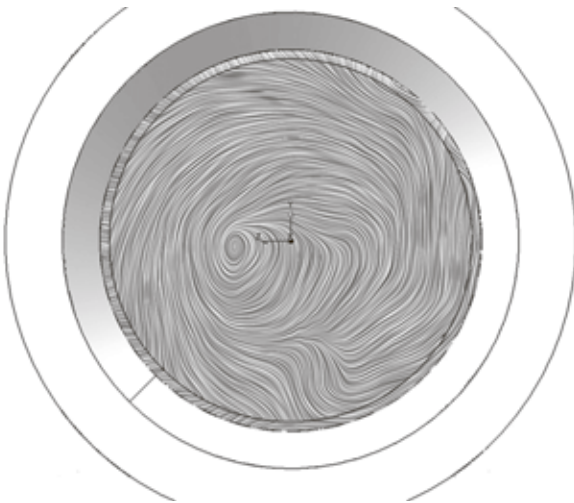


Рис. 5. Эпюра завихренности потока в поперечном сечении роторного модуля /

Fig. 5. Flow vorticity diagram in the cross-section of the rotor module

Следующим шагом при исследовании конструкции было проведение сравнения потоков в камере смешения при статической и динамической компоновках смесителя.

Полученные модели течения гетерогенных жидкостей для сравнения представлены на рисунке 6 (а и б соответственно) (см. цв. вклейку на стр. 30).

По результатам численного моделирования установлено, что в статическом смесителе (рис. 6б) наблюдается неравномерное распределение скоростного поля: основной поток прижимается к нижней части трубопровода, формируя зоны локального сгущения вследствие недостаточной турбулизации. Часть частиц транспортируется практически без закру-

тки, их траектории характеризуются слабовыраженной пространственной ориентацией, что свидетельствует о низкой степени вовлеченности в процесс смешения. Визуализация линий тока на рисунке 6б подтверждает снижение завихренности потока и, как следствие, меньшую эффективность перемешивания. Все эти недостатки отсутствуют в модели смесителя с динамической компоновкой (рис. 6а). Наглядно видно, что траектория потока имеет завихренную форму, обеспечивающую равномерное распределение вводимого компонента по сечению трубопровода. При этом оседание частиц на нижней поверхности не наблюдается, компоненты вовлекаются в общий поток и интенсивно перемешиваются за счет радиально-тангенциальной переориентации скоростей.

Согласно [14–16], основными параметрами, по которым можно провести сравнительную оценку смесительных устройств, являются эффективность и интенсивность перемешивания, а также затраченная на перемешивание энергия. Эффективность перемешивания наглядно представлена в результатах моделирования, а интенсивность перемешивания определялась расчетным методом.

Интенсивность перемешивания I характеризуется удельными энергетическими затратами N_{Π} , необходимыми для перемешивания единицы объема жидкости в единицу времени при достижении заданного качества смеси. Данный показатель отражает энергетическую нагрузку на систему и традиционно применяется для оценки статических смесителей, в которых перепад давления формируется на уже смешанном потоке, а подача дополнительного компонента осуществляется без создания значительного локального давления.

В рассматриваемой конструкции повышение перепада давления преимущественно связано с подачей вводимого компонента, тогда как для основного потока смеси гидравлические потери остаются незначительными. Снижение удельных энергозатрат достигается за счет существенно меньшего (до двух порядков) объемного расхода вводимого компонента по сравнению с расходом основного потока, что обеспечивает энергетическое преимущество предлагаемой схемы смешения.

Применительно к процессам, протекающим в динамических смесителях, энергия N_{Π} , которую необходимо затратить на перемещение, была рассчитана по формуле

$$N_{\Pi} = \Delta P \cdot V, \quad (6)$$

где ΔP – перепад давления, Па; V – объемный расход, м³/с.

Значение гидравлического сопротивления ξ определялось по формуле

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot v^2}, \quad (7)$$

где ρ – плотность, кг/м³, v – средняя скорость потока, м/с.

На основании полученных результатов из моделирования и расчетов проведено их сравнение (табл. 2).

Согласно результатам оценки значимых параметров, полученным в ходе исследования конструкции при помощи гидродинамического моделирования, можно сделать выводы, что конструкция с динамическим роторным модулем затрачивает меньше энергии на единицу объема жидкости в единицу времени для достижения определенного качества смеси.

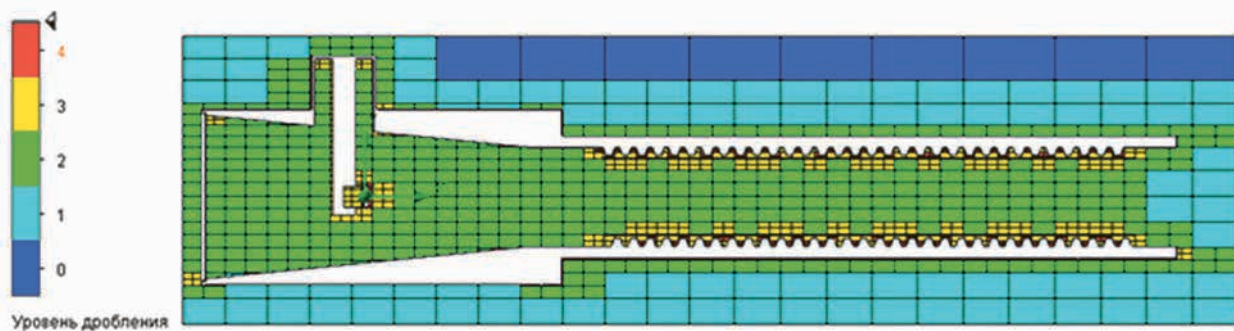


Рис. 3. Расчетная сетка модели / Fig. 3. Calculation grid of the model

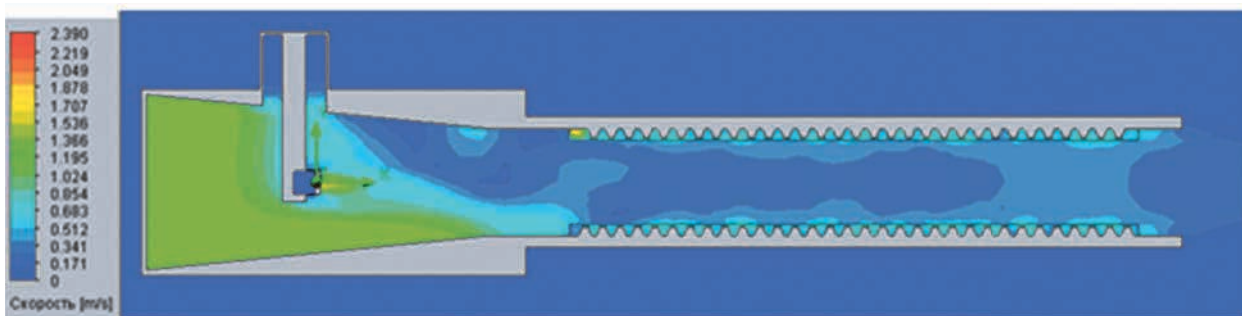


Рис. 4. Эпюра скорости в области моделирования / Fig. 4. Velocity diagram in the simulation area

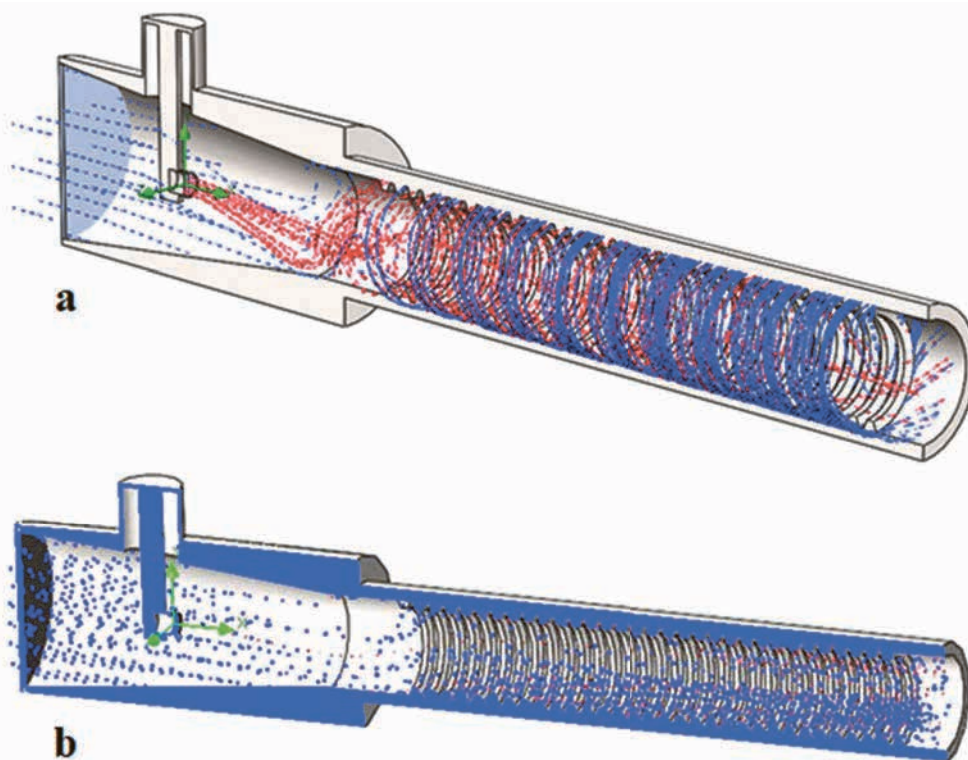


Рис. 6. Моделирование течения потока: а – динамическая компоновка; б – статическая компоновка / Fig. 6. Flow simulation: a – dynamic layout; b – static layout

Таблица 2 / Table 2

Сравнение полученных результатов из анализа двух конструкций /
Comparison of the results obtained from the analysis of two designs

Тип смесителя	Гидравлическое сопротивление ξ	Затрачиваемая энергия N_{Π}
Динамический роторный	0,613	25,5 кВт
Статичный	0,986	30,1 кВт

Выводы

1. Предложена и исследована новая комбинированная сборно-модульная конструкция геликоидного смесительного устройства на базе роторного модуля, отличающаяся размещением геликоидного рельефа на внутренней поверхности вращающейся камеры смешения. Разработанная конструкция может быть использована в процессах подготовки пульпы, реагентных растворов и эмульсионных систем в горной промышленности, где требуется интенсификация массообмена при ограниченных энергетических ресурсах.

2. Проведенное CFD-моделирование двухфазной системы показало, что применение геликоидного смесительного устройства с роторным модулем обеспечивает формирование выраженной тангенциальной составляющей скорости и устойчивого закрученного потока, что способствует интенсификации процессов смешения фаз системы жидкость – жидкость.

3. Установлено, что в динамической компоновке смеси-

теля отсутствуют застойные зоны и локальные области недосмешения, характерные для статической конструкции. Поток равномерно вовлекает дисперсную фазу, обеспечивая последовательное перераспределение компонентов по всему объему камеры смешения.

4. Расчет гидравлического сопротивления показал снижение коэффициента для динамической конструкции на 60 % по сравнению со статичной, что свидетельствует о более рациональном использовании энергии потока.

5. Определено, что затрачиваемая мощность N_{Π} при использовании роторного модуля на 18 % меньше статического аналога, что подтверждает снижение энергоемкости процесса перемешивания при сохранении требуемого качества смеси.

6. Установлено, что перераспределение энергии с осевой составляющей скорости на окружную позволяет повысить интенсивность перемешивания без существенного увеличения гидравлических потерь, обеспечивая синергетический эффект совместного действия вращения камеры и основного потока.

7. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность применения геликоидного смесительного устройства в процессах подготовки жидких и гетерогенных систем горной промышленности, где предъявляются повышенные требования к энергоэффективности, надежности и устойчивости оборудования к абразивному износу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Turgeon K., Boulanger J.-F., Bazin C. Simulation of Solvent Extraction Circuits for the Separation of Rare Earth Elements. *Minerals*. 2023; 13 (6): 714. <https://doi.org/10.3390/min13060714>.
2. Han J.R., Kim H.I., Shim H.W., Choi J.W., Je J. 3D-CFD based optimization of a mixer-settler: Part I. Development of a model for efficient pump-mixer system in mixer-settler. *Chemical Engineering Research and Design*. 2025; 220: 610-622.
3. Pradhan A.R. Rheology-driven approaches in slurry transportation: Influence of bimodal mixtures, additives, and modelling perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2025: 103714.
4. Anderson C.G. Advances in Mineral Processing and Hydrometallurgy. *Metals*. 2025; 15: 1357. <https://doi.org/10.3390/met15121357>.
5. Вопилин Р.С., Иодис В.А. Каскадная реакторная установка для бактериально-химического выщелачивания руд. *Маркишейдерия и недропользование*. 2024; 5: 49-54. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54.
6. Vopilin R.S., Iodis V.A. Cascade reactor plant for bacterial-chemical leaching ore. *Mine Surveying and Subsurface use*. 2024; 5: 49-45. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54.
7. Wang D. et al. Numerical simulation of pressure profile of mining backfill fly-ash slurry in an L-shaped pipe using a validated Herschel-Bulkley model. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023; 12 (3): 219-233.
8. Ghanem A., Lemenand T., Della Valle D., Peerhossaini H. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014; 92 (2): 205-228. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.013>.
9. Valdés J.P., Kahouadji L., Matar O.K. Current advances in liquid – liquid mixing in static mixers: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022; 177: 694-731. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.016>.
10. Милштейн Л.М., Бойко С.И., Запорожец Е. П. Нефтегазопромысловая сепарационная техника: справочное пособие. Москва, 1991: 232. Milshteyn L.M., Boyko S.I., Zaporozhets E.P. Oil and Gas Field Separation Equipment: A Reference Guide. Moscow, 1991: 232. (In Russ.).
11. Bashmur K.A., Bukhtoyarov V.V., Sergienko R.B. Improving the quality of turbine flowmeters on the basis of the use of a rotor with internal screw relief. *SOCAR Proceedings*. 2022; S1: 48-53. <https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100686>.
12. Мусазадэ Э.Ш., Башмур К.А., Бухтояров В.В. и др. Кавитатор на основе трубки Вентури с винтовым рельефом поверхности для габаритно-ограниченных гидравлических каналов. *Нефтегазовое дело*. 2022; 20 (6): 228-239. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-228-239>.
13. Musazade E.Sh., Bashmur K.A., Bukhtoyarov V.V., et al. Cavitator based on a Venturi tube with a helical surface relief for dimension-limited hydraulic channels. *Petroleum Engineering*. 2022; 20 (6): 228-239. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-228-239>.
14. Петровский Е.А., Башмур К.А., Шадчина Ю.Н. и др. Исследование технологии формирования микрорельефа на подшипниках скольжения для центробежных установок нефтегазовой отрасли. *Журнал физики: Серия конференций: Международная научная конференция по прикладной физике, информационным технологиям и инженерии «АПИТЕК-2019»*. Красноярск, 2019; 1399: 55032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055032>.
15. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., et al. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units. *Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering APITECH-2019*. Krasnoyarsk, 2019; 1399: 55032. (In Russ.). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055032>.
16. Ascensão L.F., Barbosa I.S.O., et al. CFD Simulation of a High Shear Mixer for Industrial AdBlue Production. *Mathematics*. 2025; 13 (24): 4027. <https://doi.org/10.3390/math13244027>.

14. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: физические основы и инженерные методы расчета. Ленинград, 1984: 336.
Braginskiy, L.N., Begachev, V.I., Barabash, V.M. Mixing in liquid media: physical principles and engineering calculation methods. Leningrad, 1984: 336. (In Russ.).
15. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 ч. Москва, 2002: 368.
Dutnerovskiy Yu.I. Processes and apparatuses of chemical technology: in 2 parts. Moscow, 2002: 368. (In Russ.).
16. Айнштейн В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Москва, 1999: 888.
Ainshtein, V.G. General course of processes and apparatuses of chemical technology. Moscow, 1999: 888. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Степанович Морин –

д-р техн. наук, заведующий кафедрой горных машин и комплексов института цветных металлов. ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: AMorin@sfu-kras.ru

Эльвин Шакир оглы Мусазаде –

аспирант, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Ольга Сергеевна Игнатова –

канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Виктор Игоревич Брагин –

д-р техн. наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых. ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.02.2026

Поступила после рецензирования: 21.03.2026

Принята к публикации: 05.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Andrey S. Morin –

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: AMorin@sfu-kras.ru

Elvin Sh. Musazade –

Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Olga S. Ignatova –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Viktor I. Bragin –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mineral Processing, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Contribution:

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

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 15.02.2026

Revised: 21.03.2026

Accepted: 05.04.2026

Обоснование треугольного расположения взрывных скважин на карьере и необходимой энергии взрыва

С. А. Шемякин¹, Е. А. Шишкин^{1✉}, В. Ю. Воронин²

¹Высшая школа промышленной инженерии, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация

²Компания «Ареал», г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ 004655@togudv.ru

Резюме. Разработана методика расчета технологических параметров взрывных работ, доступная для понимания и осуществления техническому персоналу карьера. Обоснована целесообразность применения треугольной сетки расположения скважин, позволяющей уменьшить участки неразрушенной породы по сравнению с прямоугольной сеткой. При исследовании напряженного состояния породы при взрыве учтена динамическая прочность. Сложность определения площади разрыва вызывает затруднение при назначении удельного расхода взрывчатых веществ. Установлен гиперболический закон изменения площади разрыва породы в зависимости от размера отдельного куска породы. Предложена методика определения энергозатрат для образования взрыва в одной скважине с учетом динамической прочности на разрыв, а также гиперболической закономерности изменения площади разрыва кусков породы. В методике учитывается размер куска породы, соответствующий вместимости рабочего органа выемочной техники, которая имеется в наличии на рассматриваемом карьере. Разработанная методика определения энергозатрат позволяет горным инженерам более обоснованно подходить к назначению удельного расхода взрывчатого вещества.

Ключевые слова: взрывная скважина, сетка, напряжение, площадь разрыва, энергозатраты

Для цитирования: Шемякин С.А., Шишкин Е.А., Воронин В.Ю. Обоснование треугольного расположения взрывных скважин на карьере и необходимой энергии взрыва. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 33-37. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-33-37>.

Justification of the triangular location of blast wells in the quarry and the required explosion energy

S. A. Shemyakin¹, E. A. Shishkin^{1✉}, V. Yu. Voronin²

¹Graduate School of advanced engineering, Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

²Areal company, Khabarovsk, Russian Federation

✉ 004655@togudv.ru

Abstract. The results of existing studies of explosive methods for preparing rock for excavation allow only an approximate determination of the size of the rock pieces during the explosion, as well as the specific consumption of explosives. The research is aimed at developing a methodology for calculating the technological parameters of blasting operations, accessible to the technical personnel of the quarry. To achieve this goal, the expediency of using a triangular grid of wells is justified, which makes it possible to reduce areas of undisturbed rock compared with a rectangular grid. When studying the stress state of the rock during an explosion, dynamic strength is taken into account. The complexity of determining the rupture area makes it difficult to determine the specific consumption of explosives. A hyperbolic law has been established for changing the fracture area of a rock depending on the size of an individual piece of rock. A method for determining the energy consumption for the formation of an explosion in one well is proposed, taking into account the dynamic tensile strength, as well as the hyperbolic pattern of changes in the fracture area of rock pieces. The developed method for determining energy consumption allows mining engineers to more reasonably approach the purpose of the specific consumption of explosives. The method takes into account the size of a piece of rock corresponding to the involvement of the working body of the excavation equipment that is available at the quarry under consideration.

Keywords: blast hole, grid, voltage, rupture area, energy consumption

For citation: Shemyakin S.A., Shishkin E.A., Voronin V.Yu. Justification of the triangular location of blast wells in the quarry and the required explosion energy. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 33-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-33-37>.

Введение

На протяжении длительного опыта взрывных работ в Российской Федерации и за рубежом выработалась тенденция с ростом вместимости ковша экскаватора увеличивать расстояние между скважинами и их диаметр (рис. 1) [1].

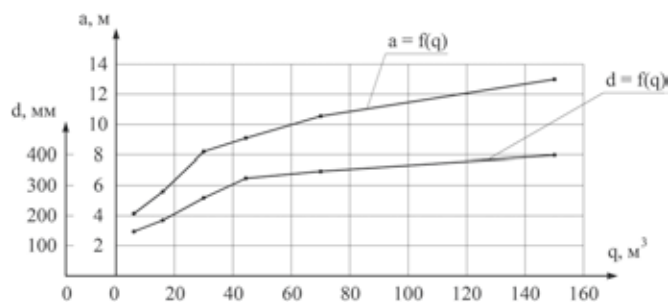


Рис. 1. Статистические зависимости изменения расстояния между взрывными скважинами a и их диаметра d от вместимости ковша экскаватора q /

Fig. 1. Statistical dependences of the change in the distance between blast wells a and their diameter d on the bucket capacity of the excavator q

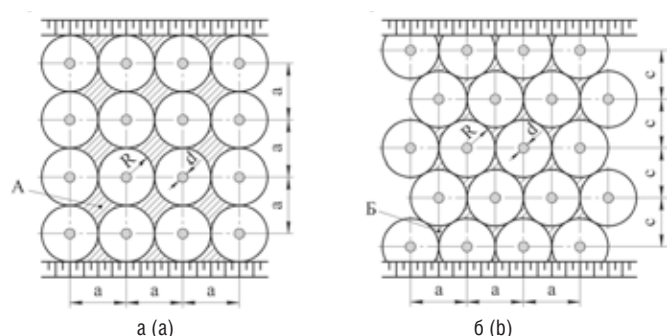
Однако по рисунку 1 невозможно определить размеры кусков породы, образовавшиеся при взрыве, которые необходимо погрузить в кузов автосамосвала. Невозможно также определить необходимый удельный расход взрывчатых веществ и т. д.

Цель исследования: разработка методики расчета технологических параметров взрывных работ, доступной для понимания и осуществления техническому персоналу карьера.

Методология

Требуется упрощенная методика расчета параметров взрывания, доступная для понимания и осуществления техническому персоналу карьера. Прежде всего целесообразно выбрать схему расположения скважин (сетку) (рис. 2).

Чаще применяют прямоугольную сетку (рис. 2а), при которой возможны значительные участки неразрушенной породы.



R – радиус наибольшего дробления; d – диаметр сечения скважины;
 A и B – участки сниженной проработки массива /
 R – radius of the largest crushing; d – diameter of the borehole section;
 A and B – areas of reduced mining of the array

Рис. 2. Схемы расположения скважин: а – расположение скважин по прямоугольной схеме; б – расположение скважин по треугольной схеме /
Fig. 2. Well location schemes: а – the location of wells according to a rectangular scheme; б – the location of wells according to a triangular scheme

Нетрудно заметить, что при треугольной схеме расположения скважин (рис. 2б) участки неразрушенной породы в 20...25 раз меньше, чем при прямоугольной. Это может способствовать уменьшению объема негабаритных кусков породы и, следовательно, повышать равномерность дробления. Кроме того, при равной обуренной площади карьерного поля треугольная сетка дает возможность пробурить четыре дополнительные скважины по подошве и кромке откосов и тем самым обеспечить полное разрушение этих зон, что невозможно при прямоугольной сетке.

Установлено [2, 3], что разрушение породы происходит в результате растяжения, поскольку предельное напряжение разрыва σ_p меньше предельных напряжения сжатия и сдвига. Однако испытать образцы породы на растяжение не удастся, потому что их торцы ломаются в зажимах разрывных машин [4, 5].

Результаты исследований

Испытания образцов на растяжение методом диаметрального сжатия давно и успешно применяется в горном деле [6, 7].

При взрыве следует учитывать динамическую прочность породы. Одним из критериев изменения прочности пород в массиве при взрыве является скорость смещения массива. Динамическую прочность пород можно рассчитать по формуле [8]

$$\sigma_d = \frac{1}{2} p \cdot c \cdot v, \quad (1)$$

где p – плотность породы, кг/м³; c – скорость звука в породе, м/с; v – скорость смещения массива, м/с; σ_d – напряжение, Па.

Возможно рассчитывать динамическую прочность при любой скорости нагружения по формуле [9]

$$\sigma_d = \sigma_{cm} (1 + k \cdot \ln \omega_d), \quad (2)$$

где σ_{cm} – статистическое напряжение при одноосном растяжении, Па; k – коэффициент (для известняка $k = 0,065$; для песчаника $k = 0,063$; для габбродиорита $k = 0,048$); ω_d – скорость нагружения, м/с.

Существенное влияние на определение энергии и усилия разрушения породы при взрыве оказывает размер кусков. При одном постоянном объеме разрушаемой породы чем меньше куски, тем больше площадь разрыва. Это положение легко доказывается на рисунке 3.

Гиперболический закон изменения площади разрыва породы S с увеличением размера отдельного куска a в определенном объеме породы, равном a^3 , приведен на рисунке 4.

В работах [10, 11] утверждается, что при разрушении породы взрывом удельный расход взрывчатых веществ нарыхление q_p составляет одну треть удельного расхода взрывчатых веществ q_b на выброс породы, то есть

$$q_p = \frac{1}{3} q_b. \quad (3)$$

Тогда полный расход взрывчатых веществ q , кг/м³, нарыхление и выброс составит

$$q = \frac{4}{3} q_p. \quad (4)$$

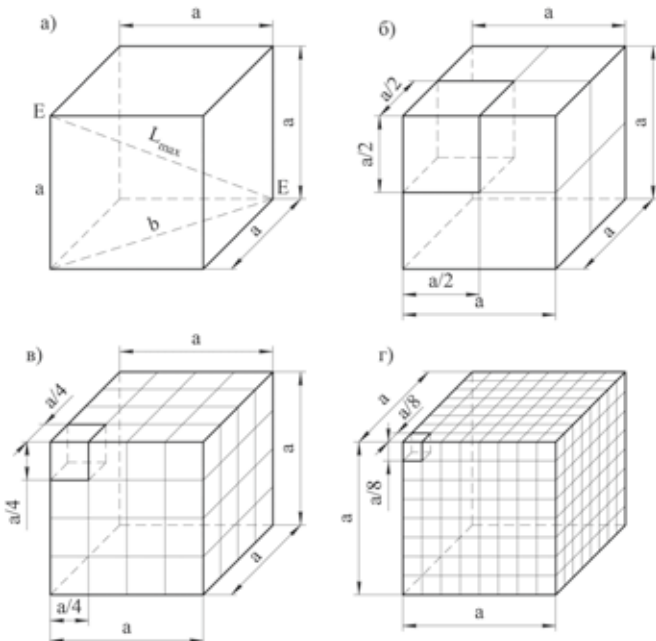


Рис. 3. Влияние изменения размера куска породы кубической формы на общую площадь разрыва S кусков при сохранении первоначального объема разрушаемой породы:

$$a - S = 6a^2; б - S = 12a^2; в - S = 24a^2; г - S = 48a^2$$

Fig. 3. The effect of a change in the size of a cubic rock piece on the total area of the rupture of S pieces while maintaining the original volume of the rock being destroyed:

$$a - S = 6a^2; б - S = 12a^2; в - S = 24a^2; г - S = 48a^2$$

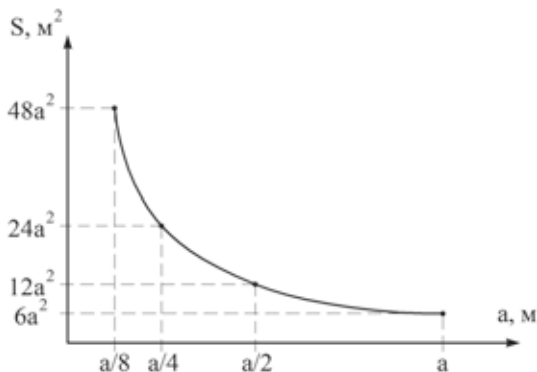


Рис. 4. Гиперболический закон изменения площади разрыва породы S с увеличением размера отдельного куска a в определенном объеме породы, равном a^3 /

Fig. 4. The hyperbolic law of the change in the fracture area of the rock S with an increase in the size of an individual piece a in a certain volume of rock equal to a^3

Однако определить по формулам (3), (4) необходимое количество взрывчатых веществ и прочие параметры взрывных работ невозможно. Необходимо это определение проводить через энергию взрыва и привлекать для расчетов динамическую прочность породы σ_d и распределение размера кусков породы по зоне взрыва.

Значения максимального размера куска полезного ископаемого при погрузке в перегрузочные бункеры, приемные отверстия дробилок, грохотов принимают [12, 13]

$$L_{\max} \leq (0,75K \ 0,85)b, \quad (5)$$

где b – ширина приемного отверстия, м.

В этом случае для щековых дробилок

$$L_{\max} = 0,7K \ 1,2 \ m. \quad (6)$$

А для конусных дробилок

$$L_{\max} = 0,4K \ 1,2 \ m. \quad (7)$$

При работе одноковшовых экскаваторов $L_{\max}$ принято [14] выбирать в зависимости от вместимости ковша V_3 экскаватора (табл.).

Таблица / Table

Максимальный размер куска полезного ископаемого / The maximum size of a piece of mineral

$L_{\max}$, м	0,5	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6
V_3 , м ³	1	2	3	4	6	8	20

Максимальный размер $L_{\max}$ куска породы в кубовой форме (рис. 5) будет равен длине отрезка EE .

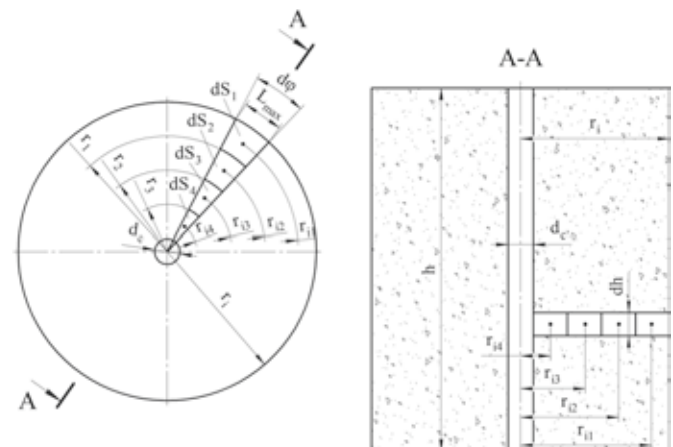


Рис. 5. Расчетная схема для определения энергии образования взрыва в скважине с учетом динамической прочности на разрыв и гиперболической закономерности изменения площади разрыва кусков породы / Fig. 5. Calculation scheme for determining the energy of explosion formation in a well, taking into account the dynamic tensile strength and the hyperbolic pattern of changes in the fracture area of rock pieces

В переходе на максимальный размер куба

$$a = \frac{L_{\max}}{1,72}. \quad (8)$$

Ниже приводится одна из возможных методик определения энергозатрат для образования взрыва в одной скважине глубиной h и диаметром d_c при радиусе зоны разрушения r_i . Все расчеты ведутся с учетом динамической прочности на разрыв σ_d , а также гиперболической закономерности изменения площади разрыва породы S .

Площадь сектора, ограниченного радиусами r_i и r_j , можно определить по [15]

$$dS_i = \frac{r_i^2 d\phi}{2} - \frac{r_j^2 d\phi}{2} = \frac{(r_i^2 - r_j^2) d\phi}{2}, \quad (9)$$

где ϕ – угол, рад.

Объем сектора, ограниченного радиусами r_i и r_1 , равен

$$dV_1 = dS_1 \cdot dh. \quad (10)$$

С учетом того, что внешний слой кусков близок к форме куба, общая площадь разрыва

$$S_1 = 6L_{\max}^2. \quad (11)$$

Тогда энергия разрыва E_1 , Н · м, будет равна

$$E_1 = P_0 \int_0^{2\pi r_{11}} dS_1 \int_0^h dh. \quad (12)$$

Площадь и объем сектора, ограниченного радиусами r_1 и r_2 , соответственно равны

$$dS_2 = \frac{(r_1^2 - r_2^2)d\varphi}{2}; \quad dV_2 = dS_2 \cdot dh. \quad (13)$$

Поскольку размер второй части сектора уменьшился, уменьшится и его объем. Однако размер куска уменьшился, и при определении площади разрыва необходимо вводить поправочный коэффициент 0,6 (рис. 4).

Тогда

$$S_2 = 9L_{\max}^2. \quad (14)$$

Энергия разрыва E_2 будет равна

$$E_2 = P_0 \int_0^{2\pi r_{12}} dS_2 \int_0^h dh. \quad (15)$$

Площадь и объем сектора, ограниченного радиусами r_2 и r_3 , соответственно равны

$$dS_3 = \frac{(r_2^2 - r_3^2)d\varphi}{2}; \quad dV_3 = dS_3 \cdot dh. \quad (16)$$

Согласно рисунку 5, объем третьей части сектора уменьшился вдвое, а размер площади разрыва кусков увеличивает вдвое, поэтому вводим коэффициент 12.

Тогда

$$S_2 = 12L_{\max}^2. \quad (17)$$

Энергия разрыва E_3 будет равна

$$E_3 = P_0 \int_0^{2\pi r_{13}} dS_3 \int_0^h dh. \quad (18)$$

Площадь и объем сектора, ограниченного радиусами r_3 и $r_4 = 0$, соответственно равны

$$dS_4 = \frac{r_3^2 d\varphi}{2}; \quad dV_4 = dS_4 \cdot dh. \quad (19)$$

Тогда

$$S_3 = 24L_{\max}^2. \quad (20)$$

Энергия разрыва E_4 будет равна

$$E_4 = P_0 \int_0^{2\pi r_{14}} dS_4 \int_0^h dh. \quad (21)$$

Суммарная энергия разрушения равна

$$\sum E = \frac{4}{3}(E_1 + E_2 + E_3 + E_4) \leq W, \quad (22)$$

где W – идеальная работа взрыва, Дж [12].

Интегральное исчисление возможно вести в приближенном варианте.

Выводы

1. Обосновано преимущественное применение треугольной сетки расположения взрывных скважин. В сравнении с прямоугольной сеткой треугольная позволяет уменьшить выход негабарита, а также уменьшить затраты на буровзрывные работы, выравнивание поверхности откосов.

2. Установлена закономерность изменения площади разрыва в зависимости от размера куска при определенном объеме породы. Данная закономерность позволяет с большей достоверностью определять энергозатраты на разрушение породы при взрывных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Катанов И.Б., Сысоев А.А., Скачилов П.Г. О совершенствовании технологии и повышении безопасности взрывных работ при увеличении вместимости ковша экскаватора. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014; 2 (102): 161-164. Katanov I.B., Sysoev A.A., Skachilov P.G. On upgrading of technology and blasting safety by increasing the capacity of the bucket excavator. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014; 2 (102): 161-164. (In Russ.).
2. Викторов С.Д., Кочанов А.Н. Развитие микротрещин при динамическом разрушении горных пород. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2015; 79 (6): 820. <https://doi.org/10.7868/S036767651506040X>. Viktorov S.D., Kochanov A.N. The development of microcracks during the dynamic destruction of rocks. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015; 79 (6): 820. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S036767651506040X>.
3. Vennes I., Mitri H., Chinnasane D.R., et al. Effect of stress anisotropy on the efficiency of large-scale destress blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021; 54: 31-46. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02252-7>.
4. Huang Z., Ren F., Yuan L., et al. Tensile strength and damage characteristics of rock under different test methods. *Experimental Technology and Management*. 2020; 37 (10): 45-49.
5. Трофимов А.В., Федосеев А.В., Кисель А.А. и др. Сравнение методик определения предела прочности образцов горных пород на одноосное растяжение раскалыванием по образующим. *Горный журнал*. 2024; 3: 65-70. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.09>. Trofimov A.V., Fedoseev A.V., Kisel A.A., et al. Comparison of methods for determining the ultimate strength of rock samples for uniaxial tensile splitting by forming. *Mining Journal*. 2024; 3: 65-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.09>.
6. Гольцев В.Ю., Осинцев А.В., Плотников А.С. и др. Диаметральное сжатие коротких цилиндров с центральным отверстием как метод оценки сопротивления разрыву хрупких материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023; 89 (7): 45-50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-45-50>. Goltsev V.Yu., Osintsev A.V., Plotnikov A.S., et al. Diametral compression of short cylinders with a central hole as a method for assessing the tear

- resistance of brittle materials. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2023; 89 (7): 45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-45-50>.
7. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки. *Записки Горного института*. 2021; 251: 639-647. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3>.
Shemyakin S., Shishkin E. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Journal of Mining Institute*. 2021; 251: 639-647. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3>.
 8. Жуков В.С. Оценка прочностных и упругих свойств горных пород Дагинского горизонта шельфа Сахалина. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020; 4: 44-57. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57>.
Zhukov V.S. Estimating the strength and elasticity of rocks in the Dagi formation on the Sakhalin shelf. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (4): 44-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/02361493-2020-4-0-44-57>.
 9. Oh S-W., Choi B., Jung Y-B., et al. A comparative study on the dynamic tensile strength evaluation method of rock materials. *Shock and Vibration*. 2023; 4: 1-14. <https://doi.org/10.1155/2023/3631729>.
 10. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р. и др. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением. *Записки Горного института*. 2024; 266: 231-245.
Vinogradov Y.I., Khokhlov S.V., Zigangirov R.R., et al. Optimization of specific energy consumption for rock crushing by explosion at deposits with complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024; 266: 231-245. (In Russ.).
 11. Nasirov U., Zairov S., Umarov F., et al. Determination of the coefficient of loosening and explosion parameters in a clamped medium in the quarry. *E3S Web of Conferences*. 2023; 417: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341701012>.
 12. Gao P., Pan C., Zong Q., et al. Rock fragmentation size distribution control in blasting: a case study of blasting mining in Changjiu Shenshan limestone mine. *Frontiers in Materials*. 2023; 10: 1330354. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1330354>.
 13. Аврамова Н.С. Бункерный способ перегрузки горной массы на карьерах. *Записки Горного института*. 2003; 155 (2): 55-57.
Avraamova N.S. Bunker method of overloading rock mass in quarries. *Journal of Mining Institute*. 2003; 155 (2): 55-57. (In Russ.).
 14. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А., и др. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 6: 111-125. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.
Marinin M.A., Rahmanov R.A., Alenichev I.A., et al. Study of the effect of the granulometric composition of the blasted rock mass on excavator performance WK-35. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; 6: 111-125. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.
 15. Коновалов В.Е., Беличев А.А., Татарчук А.П. и др. Некоторые случаи определения площадей при проведении землеустроительных работ. *Аграрное образование и наука*. 2023; 2: 2.
Konovalov V., Belichev A., Tatarchuk A., et al. Some cases of area determination during land surveying. *Agrarian education and science*. 2023; 2: 2. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Станислав Аркадьевич Шемякин –

д-р техн. наук, доцент, профессор Высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация

Евгений Алексеевич Шишкин –

канд. техн. наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: 004655@togudv.ru

Вячеслав Юрьевич Воронин –

главный инженер компании «Ареал», г. Хабаровск, Российская Федерация

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: 12.02.2026

Поступила после рецензирования: 19.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

ABOUT THE AUTHORS

Stanislav A. Shemyakin –

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Graduate School of advanced engineering, Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

Evgeny A. Shishkin –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Graduate School of advanced engineering, Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: 004655@togudv.ru

Vyacheslav Y. Voronin –

Chief Engineer, Areal company, Khabarovsk, Russian Federation

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: 12.02.2026

Revised: 19.03.2026

Accepted: 25.03.2026

Анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторождения

О. С. Колесатова^{1,✉}, М. С. Колкова², Е. А. Горбатова², А. А. Зубков²

¹НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ okolesatova@mail.ru

Резюме. Представлены результаты комплексного исследования структурной неоднородности массива горных пород и кинематической устойчивости бортов карьера Юбилейного месторождения. Целью работы являлся количественный анализ пространственных характеристик трещин для оценки рисков нарушения устойчивости массива горных пород и прогноза проявления деформаций уступов. Исследование выполнено с применением современной дистанционной технологии: на участках северо-западного борта проведена фотограмметрическая съемка экшн-камерой GoPro Hero 11 Black. Обработка данных в программном комплексе Agisoft Metashape позволила построить детальные 3D-модели уступов с высоким разрешением (GSD 2,6–5,2 мм/пикс) и погрешностью не более 0,036 м. Статистический анализ измеренных элементов залегания трещин позволил выявить на участках три значимые системы трещин. Их наличие подтверждается высокими значениями параметра концентрации Фишера (κ_f от 39,8 до 271,1). Рассчитанные коэффициенты Вудкока позволили выделить два типа структурной неоднородности: упорядоченный «идеальный» блочный массив в окварцованных породах участка 1 ($K = 4,026$, $C = 2,718$) и слабо упорядоченный, разупрочненный массив в зонах глинистого изменения участка 2 ($K = 1,442$; $C = 2,121$). Установлена связь между типом неоднородности и механизмом потенциального разрушения. Для блочного массива характерен высокий риск проявления сдвиговых обрушений (вероятность плоскостного сдвига до 68,5 %, клинового – 38 %), а для разупрочненного преобладает риск опрокидывания (вероятность до 25 %). Полученные результаты подтверждают, что количественная оценка структурной неоднородности массива горных пород является важным фактором для прогнозирования деформаций уступов и обосновывает необходимость применения дифференцированного подхода к управлению устойчивостью бортов карьера. Для блочных массивов (при высоких значениях K , C) требуются меры против сдвига по плоскостям, для разупрочненных зон (при низких значениях K) – контроль опрокидывания и обводнения. Разработанный подход применим для прогноза устойчивости и повышения безопасности на данном и аналогичных месторождениях.

Ключевые слова: структурная неоднородность массива, трещиноватость, фотограмметрия, 3D-моделирование, параметр Фишера, коэффициенты Вудкока, кинематический анализ, устойчивость борта карьера, геомеханический риск

Для цитирования: Колесатова О.С., Колкова М.С., Горбатова Е.А. Зубков А.А. Анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 38-46. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46>.

Analysis of rock mass structural heterogeneity at the Yubileynoye deposit open-pit mine

O. S. Kolesatova^{1,3✉}, M.S. Kolkova², E. A. Gorbatova², A. A. Zubkov²

¹Non-State Educational Institution of Higher Education “Technical University of UMMC”,
Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, Magnitogorsk, Russian Federation

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”,
Yekaterinburg, Russian Federation

✉ okolesatova@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the structural heterogeneity of the rock mass and kinematic stability of the pit walls at the Yubileynoye deposit. The aim of the work was a quantitative analysis of the spatial characteristics of fractures to assess the risks of rock mass instability and predict the occurrence of bench deformations. The study was carried out using modern remote sensing technology: photogrammetric survey with a GoPro Hero 11 Black action camera was conducted on sections of the northwestern pit wall. Data processing in the Agisoft Metashape software package made it possible to construct detailed 3D models of the benches with high resolution (GSD 2.6–5.2 mm/pix) and an error of no more than 0.036 m. Statistical analysis of the measured fracture orientation elements revealed three significant fracture systems in the areas. Their presence is confirmed by high values of the Fisher concentration parameter (κ from 39.8 to 271.1). The calculated Woodcock coefficients made it possible to identify two types of structural heterogeneity: an ordered “ideal” blocky rock mass in silicified rocks of site 1 ($K = 4.026$, $C = 2.718$) and a weakly ordered, weakened rock mass in zones of clay alteration at site 2 ($K = 1.442$; $C = 2.121$). A relationship was established between the type of heterogeneity and the potential failure mechanism. The blocky rock mass is characterized by a high risk of shear failures (probability of planar sliding up to 68.5 %, wedge sliding – 38 %), while for the weakened rock mass, the risk of toppling predominates (probability up to 25 %). The obtained results confirm that quantitative assessment of the structural heterogeneity of the rock mass is an important factor for predicting bench deformations and substantiates the need for applying a differentiated approach to managing pit wall stability. For blocky rock masses (at high K , C values), measures against shear along planes are required; for weakened zones (at low K values), control of toppling and water ingress is necessary. The developed approach is applicable for stability prediction and safety enhancement at this and similar deposits.

Keywords: structural heterogeneity of rock mass, fracturing, photogrammetry, 3D modeling, Fisher parameter, Woodcock coefficients, kinematic analysis, pit wall stability, geomechanical risk

For citation: Kolesatova O.S., Kolkova M.S., Gorbatova E.A., Zubkov A.A. Analysis of rock mass structural heterogeneity at the Yubileynoye deposit open-pit mine. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 38-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46>.

Введение

Современные требования к безопасной и эффективной эксплуатации карьеров обуславливают необходимость детального изучения структурной неоднородности массива горных пород [1]. Особую актуальность приобретают методы, позволяющие оперативно и безопасно получать данные о трещиноватости на труднодоступных участках.

Традиционные методы картирования трещиноватости с использованием геологического компаса имеют существенные ограничения: высокую трудоемкость, низкую производительность и невозможность документирования труднодоступных участков, что сопряжено с повышенным риском для персонала [2–5].

Применение фотограмметрической съемки позволяет исключить эти ограничения и обеспечить: высокую оперативность съемки (в 3–5 раз быстрее контактных методов), детализацию данных, возможность интеграции с геоинформационными системами, безопасность проведения работ за счет исключения нахождения персонала в опасных зонах [6, 7].

Цель исследований: анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторожде-

ния с применением фотограмметрической съемки для оценки геомеханических рисков и прогноза устойчивости уступов.

Идея работы. Полученные результаты имеют важное значение для решения актуальных задач горного производства, включая прогноз устойчивости бортов карьеров, оптимизацию параметров систем разработки и повышение безопасности ведения горных работ [8, 9].

Материал и методы исследования

Для выполнения исследований использовался комплекс методов, включающий полевые съемочные работы и камеральную обработку данных.

На подготовительном этапе были выбраны характерные участки северо-западного борта карьера, отражающие различные структурно-литологические особенности массива: от интенсивно окварцованных пород до кор выветривания горных пород, включая глинистые образования. Проведение наземной фотограмметрической съемки осуществлялось с использованием экшн-камер GoPro Hero 11 Black, что позволило создать детальные 3D-модели уступов.

Обработка полученных данных выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. Точность ре-

конструкции контролировалась по величине общей ошибки репроекции, которая для всех моделей составила менее 0,85 пикселя. Среднее разрешение (GSD) итоговых 3D-моделей составило 2,5–3,5 мм на пиксель, что достаточно для идентификации трещин раскрытием от 2 мм.

Структурный анализ включал измерение элементов залегания трещин (азимут и угол падения) непосредственно по 3D-моделям, построение диаграмм Шмида для визуализации пространственной ориентировки трещин и выделение основных систем трещиноватости на основе кластерного анализа распределения полюсов трещин [10–13].

Количественная оценка параметров трещиноватости была проведена с расчетом параметра концентрации Фишера (κ_ϕ)

$$\kappa_\phi = (N - 1) / (N - |R|),$$

где N – количество полюсов;

R – величина результирующего вектора (т. е. величина векторной суммы всех полюсных векторов в наборе).

Интерпретация:

$k \rightarrow 0$ – равномерное распределение;

$k > 10$ – высокая концентрация;

$k > 50$ – очень высокая концентрация.

Для интегральной оценки структурных особенностей массива на каждом участке были определены параметры Вудкока [10].

Коэффициент K отражает распределение данных на диаграмме Шмида, его граничным состоянием является значение $K = 1$. При условии $K > 1$ данные, отраженные на диаграмме Шмида, характеризуются плоскостным распределением. При этом поверхность по своей форме будет стремиться к плоскости. Если значения $K < 1$, данные, отраженные на диаграмме Шмида, характеризуются распределением в виде пояса, поверхность имеет выпуклую (вогнутую) форму.

Коэффициент C показывает степень анизотропности поверхности. При $C = 0$ распределение данных, отраженных на диаграмме Шмида, имеет случайное распределение. Если $1 < C < 4$, поверхность обладает ярко выраженными анизотропными свойствами и, как следствие, имеет более высокую вероятность смещения по плоскости нарушения. При $C > 4$ поверхность будет иметь наиболее подвижные нарушения, поэтому при кинематическом анализе этой группы необходимо уделять особое внимание.

Морфометрический анализ трещин включает оценку раскрытия, а также выявление зон повышенной трещиноватости в местах пересечения различных систем.

На заключительном этапе была проведена комплексная интерпретация всех полученных данных. Выделенные системы трещин с высокими значениями концентрации Фишера ($\kappa_\phi > 10$) и массивы с коэффициентами Вудкока $K > 1$ и $C > 1$ рассматривались как зоны повышенного геомеханического риска, что послужило основой для последующего кинематического анализа устойчивости уступов.

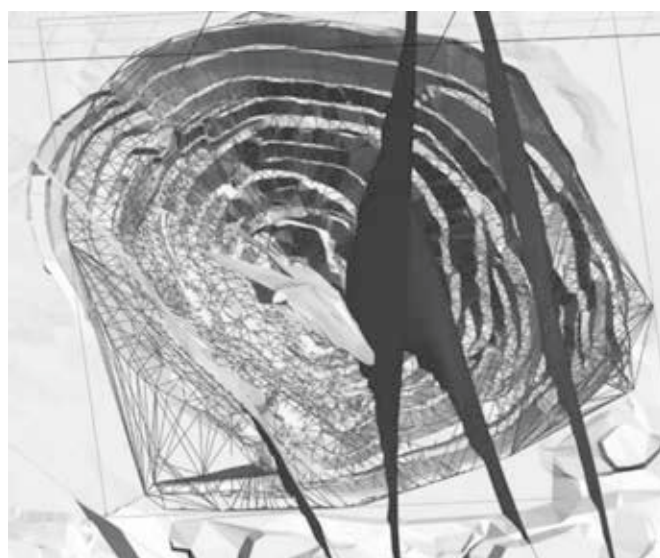
Результаты

Объект исследований

Месторождение Юбилейное локализовано в пределах баймак-бурибаевской вулканогенной свиты верхнего силура, представленной интенсивно трещиноватыми и метасо-

матически измененными породами – дацитами, андезитами, спилитами и базальтами. В разрезе четко выделяются два структурных этажа. Нижний этаж сложен вулканогенными образованиями с широким развитием процессов окварцевания, серицитизации и хлоритизации. Верхний этаж образован рыхлыми мезо-кайнозойскими отложениями, залегающими с угловым несогласием на подстилающих породах и представленными мощной толщей юрских песчано-глинистых пород и четвертичных суглинков, подстилаемых глинистой корой выветривания [14].

Ключевую роль в формировании структуры месторождения сыграли Бурибайский разлом и Макано-Петропавловская тектоническая зона, а само месторождение приурочено к узлу их сочленения. Бурибайский разлом имеет крутое восточное падение ($75\text{--}80^\circ$) и амплитуду смещения до 500–1000 м. Макано-Петропавловская зона представляет собой серию кулисообразных нарушений северо-западного простирания (рис. 1).



а (a)



б (b)

Рис. 1. Тектонические нарушения: а – расположение тектонических нарушений относительно карьера; б – фото участка с выходом разлома в северо-западном борту карьера /

Fig. 1. Tectonic faults: а – location of tectonic faults relative to the open-pit mine; б – photo of the site with fault outcrop in the northwestern pit wall

Проявленная на месторождении пострудная тектоника оказывает доминирующее влияние на устойчивость массива

ва горных пород. Она выражена системой крутопадающих нарушений субмеридионального простирания, представленных зонами расщепления и милонитовыми швами, и пологопадающими нарушениями с заполнением глиной трения. Массив характеризуется интенсивной мелкой трещиноватостью: модуль трещиноватости превышает 10 трещин на метр, а коэффициент раздробленности варьируется в пределах от 0 до 100 %, что свидетельствует о крайней неоднородности и нарушенности массива горных пород.

Геолого-структурные особенности массива в совокупности с контрастными физико-механическими свойствами комплексов горных пород обуславливают необходимость картирования структурных нарушений для оценки устойчивости уступов. Особое внимание уделялось картированию зон с интенсивной трещиноватостью и участков развития тектонических нарушений с глиной трения, представляющих наибольшую опасность для устойчивости бортов карьера.

Характеристика изучаемых объектов

Для фотограмметрической съемки были выбраны характерные участки северо-западного борта карьера.

Участок 1 сложен интенсивно трещиноватыми дацитами и андезитами. С зонами трещиноватости широко связаны процессы метасоматоза: окварцевание, гематитизация и сульфидизация в форме пирита. Наблюдаются дациты с прожилковым окварцеванием и пиритной минерализацией, дациты с интенсивной гематитизацией по магматическим минералам, а также андезиты, интенсивно замещенные кварцем.

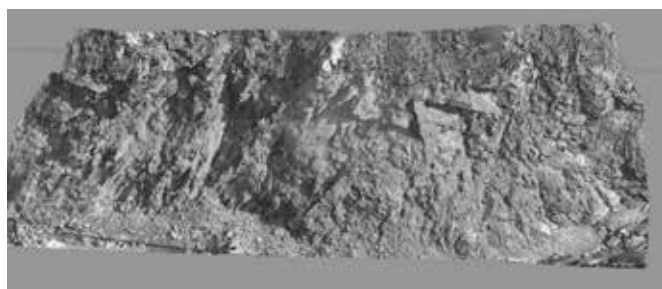
Участок 2 представлен дацитами и андезитами, преобразованными в условиях зеленосланцевого метаморфизма и выветривания. Для дацитов характерно широкое развитие хлорита, эпидота и актинолита, андезиты подвержены интенсивному выветриванию с полным замещением первичных минералов глинисто-гидрослюдистыми агрегатами. В отличие от первого участка наблюдаются процессы разрыхления и ослабления горных пород.

Изучаемые участки характеризуются хорошей обнаженностью и доступностью для дистанционной съемки. Высота уступов на исследуемых участках варьируется от 10 до 18 м, угол откоса – от 60° до 70°.

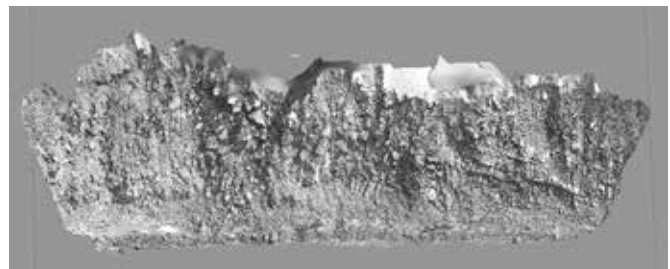
По результатам проведенной фотограмметрической съемки для каждого участка была построена детальная 3D-модель в программном комплексе Agisoft Metashape Professional (рис. 2) [15–17].

Полученные модели характеризуются высокой геометрической точностью и достоверно передают особенности строения горного массива.

На созданных 3D-моделях было проведено выделение всех видимых тектонических нарушений (трещин), имеющих открытые поверхности (рис. 3).

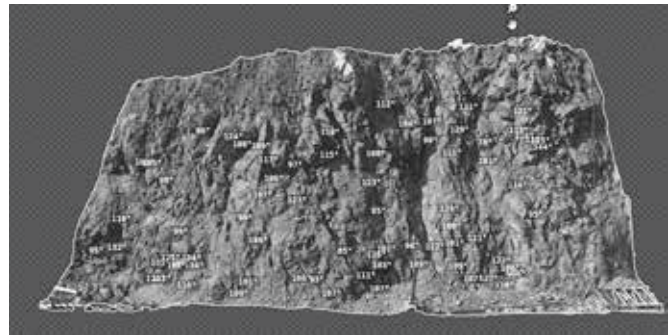


a (a)

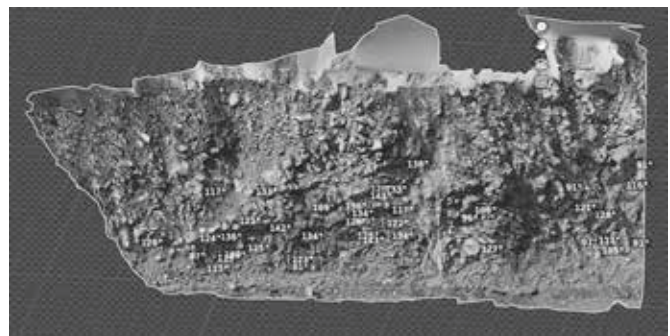


б (b)

Рис. 2. 3D-модели участков 1 (а) и 2 (б) /
Fig. 2. 3D-models of sites 1 (a) and 2 (b)



a (a)



б (b)

Рис. 3. Выделение трещин на участках 1 (а) и 2 (б) /
Fig. 3. Fracture identification at sites 1 (a) and 2 (b)

Анализ данных измерений элементов залегания трещин (азимут и угол падения) позволил выявить структурные особенности массива горных пород.

Участок 1. Пространственные характеристики трещин имеют дискретно-системное распределение полюсов (рис. 4а).

Статистическая обработка позволила выделить три преобладающие системы трещин со следующими пространственными характеристиками:

– **I система (ЮВ падение) трещин:** азимут простирания от 130 до 170° и угол падения от 60 до 87° при их средних значениях 165° и 54° соответственно;

– **II система (ЮЗ падение) трещин:** азимут простирания от 200 до 250° и угол падения от 10 до 35° при их средних значениях 228° и 33° соответственно;

– **III система (ЮВ падение) трещин:** азимут простирания от 140 до 160° и угол падения от 60 до 85° при их средних значениях 151° и 74° соответственно.

Выделенные системы трещин формируют трещинно-блоковую структуру. I и III системы трещин – крутопадающие, создают границы блоков, II система – пологая, обеспечивает

внутреннюю расланцованность блоков. Взаимное пересечение систем создает зоны повышенной трещиноватости, определяя фильтрационные свойства и устойчивость массива.

Количественная оценка параметров трещиноватости (табл. 1) подтверждает и детализирует качественные наблюдения.

Таблица 1 / Table 1

Количественная оценка параметров трещиноватости участка 1 /
Quantitative assessment of fracturing parameters at site 1

Система трещин	Угол наклона	Азимут простирания	Параметр концентрации (критерий Фишера), κ_f	Надежность определения средних направлений (95 %)
I	50,5	166,9	138,8	2,7°
II	34,7	218,9	233,8	2,5°
III	64,0	149,8	271,1	2,7°

Установлено, что параметры концентрации Фишера значительно превышают пороговое значение $\kappa_f = 10$, что свидетельствует о статистической значимости этих систем. Можно предположить, что трещины формировались под воздействием однородных региональных тектонических напряжений. Надежность определения средних направлений этих систем достаточно высока, при вероятности 95 % отклонение не превышает 3°. Выделенные системы являются надежно установленными структурными элементами массива, и их параметры могут быть использованы для последующего геомеханического моделирования.

Плотностные характеристики трещиноватости показывают значительную неоднородность массива. Линейная плотность варьируется от 5 до 15 трещин на погонный метр. Преобладают трещины с раскрытием до 5 мм (75 % от общего количества), при этом 15 % трещин имеют раскрытие более 5 мм. Трещины выполнены раздробленной породой с глинистыми включениями. Поверхность трещин – шероховатая, реже – гладкая. Средняя длина трещин составляет 3–10 м, максимальные значения – до 15 м для систем I и III. Расстояния между трещинами изменяется от 6 до 20 см.

Для участка 2 пространственные характеристики трещин имеют дискретно-системный характер распределения полюсов (рис. 4б).

Выделены три основные системы, имеющие определенные геометрические параметры и, вероятно, различный генезис:

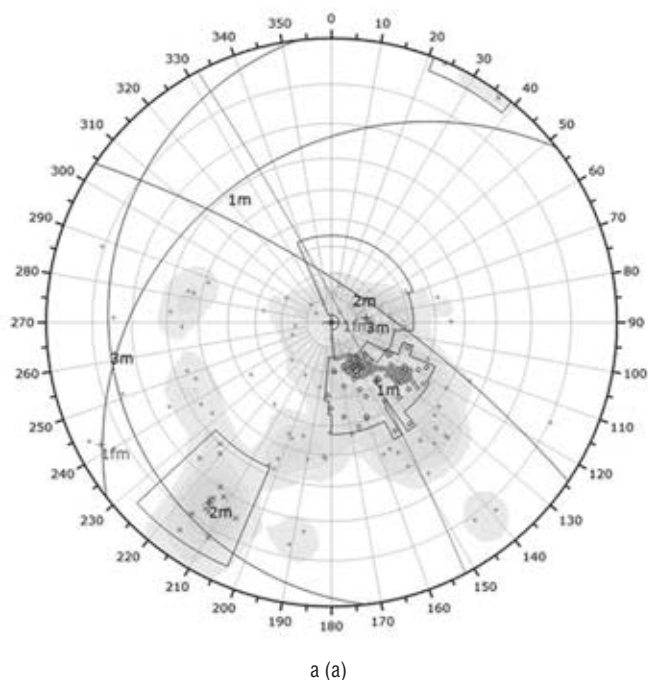
– IV система (ЮВ падение) трещин локализуется в центре диаграммы Шмита, характеризуется азимутом простирания от 130 до 170° и углом падения от 10 до 30° при их средних значениях 142° и 29° соответственно;

– V система (ЮЗ падение) трещин характеризуется азимутом простирания от 200 до 230° и углом падения от 70 до 85° при их средних значениях 214° и 75° соответственно;

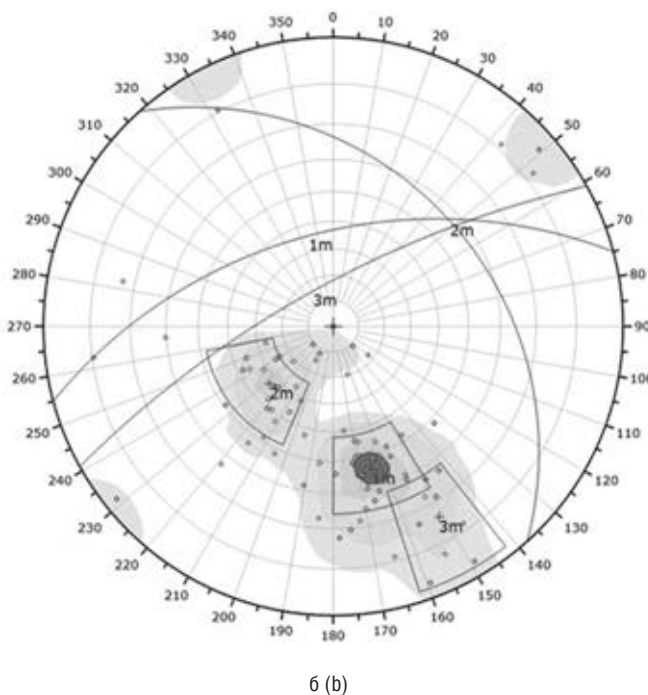
– VI система (В падение) трещин локализуется в центре диаграммы Шмита и характеризуется азимутом простирания от 60 до 110° и углом падения от 10 до 20° при их средних значениях 83° и 14° соответственно.

На участке 2 наблюдается увеличение плотности трещин в зонах пересечения различных систем. Крутопадающие трещины (система V) часто выполняют роль границ блоков, тогда как пологозалегающие (система IV) определяют внутреннюю расланцованность этих блоков.

Анализ количественной оценки параметров трещиноватости подтверждает и детализирует качественные наблюдения. Результаты представлены в таблице 2.



а (a)



б (b)

Рис. 4. Системы трещин на участках 1 (а) и 2 (б) /
Fig. 4. Fracture systems at sites 1 (a) and 2 (b)

Высокие значения параметра концентрации Фишера κ_f от 39,8 до 64,1 для всех систем свидетельствуют об отсутствии случайного характера скопления трещин, а представляют собой устойчивые структурные элементы, сформированные региональными тектоническими напряжениями.

Надежность определения средних направлений этих систем высока, о чем говорят крайне малые их значения ~3,4–4,5° для 95 % вероятности.

Таблица 2 / Table 2

**Количественная оценка параметров трещиноватости участка 2 /
Quantitative assessment of fracturing parameters at site 2**

Система трещин	Угол наклона	Азимут простирания	Параметр концентрации (критерий Фишера), κ_{ϕ}	Надежность определения средних направлений (95%)
IV	29,23	142,45	39,8	3,4°
V	75,44	213,85	64,1	4,4°
VI	14,06	83,16	46,2	4,0°

Таким образом, количественные данные не только подтверждают структурную модель участка, но и позволяют оценить вклад каждой системы в общую нарушенность массива, что крайне важно для дальнейшей оценки его устойчивости.

Плотностные характеристики трещиноватости показывают значительную неоднородность участка. Линейная плотность варьируется от 8 до 15 трещин на погонный метр. Преобладают трещины с раскрытием более 5 мм. Поверхность трещин – шероховатая, реже – гладкая. Трещины выполнены раздробленной хлоритизированной породой. Средняя длина трещин составляет 10–20 м. Расстояния между трещинами изменяются от 6 до 20 см.

На основе комплексного анализа установлено, что массивы горных пород обоих участков характеризуются четко выраженной трещинно-блоковой структурой, сформированной тремя статистически значимыми системами трещин. Высокие значения параметра концентрации Фишера свидетельствуют о формировании этих систем под воздействием устойчивых региональных тектонических напряжений. Исключительно высокая надежность определения средних направлений подтверждает достоверность выделенных структурных неоднородностей (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Параметры систем трещин /
Parameters of fracture systems**

Номер участка	Система трещин	Параметр	Значение	Интенсивность трещиноватости, 1/м	Блочность массива
Участок 1	I	Азимут падения, °	165	5–15	Мелкая
		Угол падения, °	54		
	II	Азимут падения, °	228		
		Угол падения, °	33		
	III	Азимут падения, °	151		
		Угол падения, °	74		
Участок 2	IV	Азимут падения, °	142	8–15	От мелкой до средней
		Угол падения, °	29		
	V	Азимут падения, °	214		
		Угол падения, °	75		
	VI	Азимут падения, °	83		
		Угол падения, °	14		

Анализ полученных результатов демонстрирует формирование на исследуемых участках системы трещин с выраженной пространственной ориентацией. Для уточненной оценки состояния блокового массива и определения степени

влияния тектонических нарушений применяют коэффициенты Вудкока (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Результаты анализа значений векторов поверхностей участков /
Results of analysis of surface vector values at the sites**

Номер участка	s1	s2	s3	K	C
1	0,848	0,096	0,056	4,026	2,718
2	0,711	0,203	0,085	1,442	2,121

На участке 1 процессы окварцевания и гематитизации привели к «цементации» и укреплению стенок трещин, сохранив при этом их морфологическую и пространственную четкость. Это проявилось в высоких значениях параметра концентрации Фишера ($\kappa_{\phi} > 138$) и сформировало блочную структуру с максимальными значениями коэффициента Вудкока K (4,026). Высокое значение C (2,718) подтверждает, что анизотропия массива горных пород выражена и контролируется небольшим количеством доминирующих систем трещин. Таким образом, на этом участке трещины выполняют роль четких структурных границ, разделяющих относительно прочные блоки.

На участке 2 преобладание процессов хлоритизации, эпидотизации и выветривания привело к принципиально иному результату. Метасоматические минералы и глинистые агрегаты заполнили и «размазали» первичные трещинные поверхности, преобразуя нарушения в системы трещин. Это выразилось в более низких значениях параметра Фишера ($\kappa_{\phi} = 39,8–64,1$) и коэффициента K (1,442). При этом сохранение анизотропии (C = 2,121) свидетельствует о том, что общая ориентировка систем трещин связана с первичной тектонической структурой.

Ключевым практическим следствием данного структурно-районирования является прямая связь типа неоднородности с прогнозируемым механизмом разрушения. Упорядоченный блочный массив участка 1 предопределяет высокий риск структурно-контролируемых обрушений (плоскостной и клиновой сдвиг). Слабо упорядоченный, но разупрочненный массив участка 2 создает предпосылки для деформаций смешанного типа, включая опрокидывание и потенциальное сползание по ослабленным зонам, заполненным глинистым материалом.

Обсуждение результатов

По особенностям пространственных взаимоотношений поверхностей ослаблений и элементов откоса выделяют возможные типы нарушения устойчивости: сдвиг по плоскости (Planar Sliding), сдвиг клина (Wedge) и опрокидывание двух видов: прямое (Direct Toppling) и с изгибом (Flexural Toppling). Определение вероятности реализации механизмов производится при помощи кинематического анализа по стереограммам трещиноватости [18–21].

Для анализа устойчивости уступов использовались данные по двум характерным участкам. Первый участок имеет следующие геометрические параметры: азимут падения – 230°, угол падения – 60° и высоту уступа – 20 м. Второй участок характеризуется азимутом падения – 252°, таким же углом падения в 60° и высотой уступа, равной 12 м.

Результаты кинематического анализа (табл. 5) наглядно подтверждают и детализируют выводы, сделанные на этапе структурного анализа, и напрямую связывают их с конкретными рисками.

Таблица 5 / Table 5

**Результаты кинематического анализа вероятностных схем
обрушения откосов карьера /
Results of kinematic analysis of probabilistic failure schemes of open-
pit slopes**

Участок	Схема деформирования уступа	% критических пересечений	Залегание систем трещин, вызывающих обрушения (азимут падения / угол падения)	
1	Planar Sliding	50	228 / 33	
	Wedge Sliding	38	165 / 54	151 / 71
	Direct Toppling	25	228 / 33	95 / 39
2	Planar Sliding	4	142 / 29	
	Wedge Sliding	8	214 / 75	142 / 29
	Direct Toppling	15	142 / 29	

Кинематический анализ участка 1, характеризующегося выраженной упорядоченной блочной структурой (коэффициент Вудкока $K = 4,026$), демонстрирует, что потенциальные механизмы деформации детерминированы геометрией систем трещин. Для участка 1 выявлен риск плоскостного сдвига (5 %), образованный пологой системой трещин (II – 228 / 33°) указывающий на возможность обрушения. Такой механизм характеризуется смещением значительного блока породы вдоль протяженной, непрерывной плоскости ослабления. Риск клинового сдвига (38 %), формируемого пересечением систем I и III, подтверждает, что массив расчленен на систему полиэдрических блоков, устойчивость которых зависит от сцепления в линии их пересечения. Совокупность этих факторов, а также высокие значения параметра концентрации Фишера ($\kappa_\phi > 138$) и коэффициента анизотропии C (2,718) позволяют классифицировать участок 1 как зону потенциально неустойчивого блочного массива.

Для участка 2, характеризующегося низкой степенью структурной упорядоченности ($K = 1,442$), кинематический анализ демонстрирует иную модель механизмов разрушения. Низкие вероятности сдвиговых механизмов (плоскостной – 4 %, клиновой – 8 %) при относительном преобладании риска прямого опрокидывания (15 %). Данный механизм, формируемый крутопадающими трещинами системы II (214/75°), характерен для прогрессирующего, часто ползучего разрушения, зарождающегося в нижней части уступа. Это согласуется с литолого-петрографическими данными: процессы выветривания и хлоритизации преобразовали трещины в распределенные зоны ослабления. Такое изменение структурной геометрии массива снижает вероятность мгновенного сдвига по четким плоскостям, но создает предпосылки для длительных деформаций опрокидывания, что требует иных подходов к мониторингу.

Кинематический анализ оценивает возможность обрушения, но не учитывает напряженное состояние, прочность по трещинам и гидродинамическое давление. Высокая вероятность на участке 1 указывает на критическую необходимость следующего этапа – детального геомеханического моделирования с назначением прочностных свойств выделенным системам трещин (σ , ϕ) и оценкой коэффициента запаса устойчивости.

Выявленные зоны пересечения систем трещин, особенно на участке 1, являются потенциальными источниками клинового сдвига и каналами повышенной водопроницаемости. Обводнение этих зон может резко снизить напряжение на контактах и привести к переходу от потенциально неустойчивого состояния к активному.

Полученные результаты обосновывают необходимость применения дифференцированной системы мониторинга:

– для участка 1 приоритетным является мониторинг смещений по конкретным кинематически выделенным плоскостям (система II);

– для участка 2 акцент должен быть сделан на мониторинг деформаций верхней бровки и поверхности откоса, например, с помощью систем наземного радарного мониторинга или повторной фотограмметрической съемки.

Проведенный комплексный анализ, включающий структурное картирование и кинематическую оценку, позволил не только выявить риски нарушения устойчивости, но и установить их закономерности и причины. Это создает основу для разработки обоснованных и экономически эффективных мероприятий по обеспечению устойчивости бортов карьера месторождения Юбилейное.

Заключение

В результате проведенного исследования была выполнена комплексная оценка структурной нарушенности массива горных пород бортов карьера Юбилейного месторождения. Эффективность примененной комплексной оценки, основанной на совместном использовании наземной фотограмметрии, статистического и кинематического анализов, получила практическое подтверждение.

Работа позволила сформулировать следующие основные выводы:

1. Апробирована и верифицирована методика дистанционного картирования. Применение экшн-камеры GoPro Hero 11 Black и обработка данных в Agisoft Metashape позволили создать детализированные (GSD 2,5–3,5 мм/пикс.) 3D-модели обнажений. Сравнение с традиционными контактными измерениями показало расхождение в определении элементов залегания трещин не более 5°, что подтверждает достоверность метода при его высокой оперативности (в 3–5 раз) и безопасности.

2. Установлены закономерности пространственного распределения трещиноватости и выявлена их связь с условиями формирования структурных нарушений. На двух участках выделены три статистически значимые системы трещин. Высокие значения параметра концентрации Фишера ($\kappa_\phi > 39$ для всех систем) однозначно указывают на их формирование под влиянием устойчивых региональных тектонических напряжений, связанных с Бурибайским разломом и Макано-Петропавловской зоной.

3. Выполнена количественная классификация массивов на основе параметров Вудкока, выявившая прямое влияние типа постминеральных изменений:

– участок 1 (окварцованные породы) характеризуется упорядоченной «идеальной» блочной структурой ($K = 4,026$) с выраженной анизотропией ($C = 2,718$), где трещины играют роль границ между блоками;

– участок 2 (глинисто-хлоритовое изменение) обладает слабо упорядоченной, но разупрочненной структурой ($K = 1,442$, $C = 2,121$), где первичные трещины преобразованы в зоны ослабления.

Полученные различия в характеристиках массивов доказывают, что структурные особенности массива сформированы не только тектоническими процессами, но и последующими метасоматическими преобразованиями и гипергенным выветриванием.

4. Выполнен количественный прогноз рисков, связанный с установленными типами структур.

Кинематический анализ установил связь между коэффициентами Вудкока и вероятностью механизмов разрушения:

– для участка 1 доминируют риски крупномасштабных, структурно-детерминированных обрушений: плоскостной сдвиг (50 %) по системе II и клиновой сдвиг (38 %);

– для участка 2 преобладает риск постепенного, прогрессирующего разрушения в форме прямого опрокидывания (15 %).

5. Предложены рекомендации по обеспечению безопасности ведения горных работ. Результаты исследований показывают, что применение единых подходов ко всему объекту исследования неэффективно.

Для предотвращения потери устойчивости уступов необходимо:

– провести структурное районирование бортов карьера на основе количественных критериев, таких как коэффициенты Вудкока (K, C) и параметр концентрации Фишера (κ_ϕ). Это позволит выделить зоны с различными типами структурной неоднородности;

– внедрить дифференцированную систему мониторинга, ко-

торая для массивов с упорядоченной блочной структурой должна быть направлена на обнаружение смещений по выделенным опасным плоскостям, а для зон с разупрочненным массивом – на измерение общих деформаций поверхности откоса.

Выводы

1. Настоящее исследование подтверждает эффективность комплексного подхода, основанного на дистанционном 3D-моделировании и структурно-кинематическом анализе, для оценки устойчивости бортов карьера. Практическим результатом является доказанная необходимость дифференцированного управления рисками: для упорядоченных блочных массивов (высокие K и C) ключевыми являются меры против сдвига по конкретным плоскостям, а для разупрочненных зон (низкий K) – контроль опрокидывания и обводнения.

2. Разработанная методика и сделанные выводы служат основой для повышения безопасности горных работ на Юбилейном месторождении и могут быть применены на других объектах со сложной геологической структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. Москва, 2022: 102.
Methodological guidelines for studying rock mass to ensure the stability of open-pit walls, benches and dump slopes. Moscow, 2022: 102. (In Russ.).
2. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. Москва, 1970: 160.
Rats M.V., Chernyshev S.N. Fracturing and properties of fractured rocks. Moscow, 1970: 160. (In Russ.).
3. Латышев О.Г., Прищепа Д.В., Франц В.В. Статистическое моделирование природных трещин. *Известия вузов. Горный журнал*. 2016; 5: 38-45.
Latyshev O.G., Prishchepa D.V., Frants V.V. Statistical modeling of natural fractures. *Universities News. Mining Journal*. 2016; (5): 38-45. (In Russ.).
4. Протодяконов М.М. Методы оценки трещиноватости и прочности горных пород в массиве. Москва, 1964: 32.
Protodyakonov M.M. Methods for assessing fracturing and strength of rocks in the massif. Moscow, 1964: 32. (In Russ.).
5. Серебряков Е.В., Гладков А.С., Гапфаров Т.Д. Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 160-177. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160.
Serebryakov E.V., Gladkov A.S., Gaptarov T.D. Review of modern data collection methods for assessing structural disturbance of rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; (9): 160-177. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160.
6. Ливинский И.С., Митрофанов А.Ф., Макаров А.Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность. *Горный журнал*. 2017; 8: 51-55.
Livinsky I.S., Mitrofanov A.F., Makarov A.B. Integrated geomechanical modeling: structure, geology, reasonable sufficiency *Mining Journal*. 2017; (8): 51-55. (In Russ.).
7. Herrero M.J. Pérez-Fortés A.P., Escay J.I., et al. 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization. *Computers & Geosciences*. 2022; 163: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105121>.
8. Колесатова О.С., Романько Е.А., Григорьева Н.Ю. и др. Оценка устойчивости бортов карьера с учетом структурных особенностей при- бортового массива пород (на примере Камаганского колчеданного месторождения). *Современные технологии и развитие политехнического образования: научное электронное издание*. Владивосток, 2016: 215-219.
Kolesatova O.S., Romanko E.A., Grigorieva N.Yu., et al. Assessment of open-pit wall stability considering structural features of the near-wall rock mass (on the example of the Kamagan copper-pyrite deposit). *Modern Technologies and Development of Polytechnic Education: Scientific Electronic Publication*. Vladivostok, 2016: 215-219. (In Russ.).
9. Редькин Г.М. Показатели структурной раздробленности массивов горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009; 12: 219-225.
Redkin G.M. Indicators of structural fragmentation of rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009; (12): 219-225. (In Russ.).
10. Сергунин М.П., Еременко В.А. Обработка структурных геологических моделей алгоритмами искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 2-13. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_2.
Sergunin M.P., Eremenko V.A. Processing of structural geological models by artificial intelligence algorithms. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; (9): 2-13. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_2.
11. Дэвис Д.С. Статистический анализ данных в геологии. Москва, 1990: 319.
Davis D.S. Statistical analysis of data in geology. Moscow, 1990: 319. (In Russ.).
12. Caumon G., Gray G., Antoine C., et al. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: Theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013; 3 (51): 1613-1621. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2207727>.
13. Battulwar R., Zare-Naghadhehi M., Emami E., et al. A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13 (4): 920-936. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>.
14. Аллабердин А.Б., Валеев А.С., Зубков А.А. Анализ горно-геологических условий залегания медноколчеданных месторождений. *Успехи современного естествознания*. 2021; 4: 44-51.
Allaberdin A.B., Valeev A.S., Zubkov A.A. Analysis of mining-geological conditions of copper-pyrite deposits. *Advances in Current Natural Sciences*. 2021; (4): 44-51. (In Russ.).

15. Борзенко Г.Б., Николаев А.Ю. Современные методы оптимизации DFN моделей при комплексировании геолого-геофизических данных. *Экспозиция Нефть Газ*. 2025; 1: 36-43. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2025-1-36-43>.
Borzenko G.B., Nikolaev A.Yu. Modern methods of DFN models optimization when integrating geological and geophysical data. *Exposition Oil & Gas*. 2025; (1): 36-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2025-1-36-43>.
16. Li A., Li Y., Wu F., et al. Simulation method and application of three-dimensional DFN for rock mass based on Monte-Carlo technique. *Applied Sciences*. 2022; 12 (22): 1-12. <https://doi.org/10.3390/app122211385>.
17. Herrero M.J., Pérez-Fortesb A.P., Escavy J.I., et al. 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization. *Computers & Geosciences*. 2022; 163: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105121>.
18. Колесатова О.С. Особенности структурного строения горного массива месторождения Камаган. *Рациональное природопользование: сборник научных трудов*. Магнитогорск, 2014: 20-24.
Kolesatova O.S. Features of the structural structure of the rock mass at the Kamagan deposit. *Rational Nature Management: Collection of Scientific Papers*. Magnitogorsk, 2014: 20-24. (In Russ.).
19. Корчак С.А., Абатурова И.В., Савинцев И.А. и др. Оценка состояния массива горных пород для выделения потенциально опасных участков проектируемого карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 9: 87-98. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_87.
Korchak S.A., Abaturova I.V., Savintsev I.A., Storozhenko L.A. Assessment of rock mass condition for identification of potentially hazardous areas in a designed open-pit mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022; (9): 87-98. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_87.
20. Колесатова О.С., Горбатова Е.А. Оценка возможности проявления деформаций с позиции нарушенности массива (на примере месторождения Камаган). *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020; 4 (60): 173-182. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-173-182>.
Kolesatova O.S., Gorbatoeva E.A. Assessment of the possibility of deformations from the perspective of massif disturbance (on the example of the Kamagan deposit). *News of the Ural State Mining University*. 2020; 4 (60): 173-182. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-173-182>.
21. Игнатенко И.М., Яницкий Е.Б., Дунаев В.А. и др. Трещиноватость породного массива в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». *Горный журнал*. 2019; 10: 11-15. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.01>.
Ignatenko I.M., Yanitsky E.B., Dunaev V.A., et al. Fracturing of the rock mass in the open pit of the Zhelezny mine of JSC Kovdorsky GOK. *Mining Journal*. 2019; (10): 11-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.01>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оксана Сергеевна Колесатова –

доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9307-9779>; e-mail: okolesatova@mail.ru

Мария Сергеевна Колкова –

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, маркишейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

Елена Александровна Горбатова –

доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры маркишейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

Антон Анатольевич Зубков –

доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

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: 17.02.2026

Поступила после рецензирования: 26.03.2026

Принята к публикации: 04.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Oksana S. Kolesatova –

Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9307-9779>; e-mail: okolesatova@mail.ru

Maria S. Kolkova –

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor of the Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

Elena A. Gorbatoeva –

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Professor of the Department of Surveying and Mineral Processing Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

Anton A. Zubkov –

Dr. Sci. (Technical), Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation

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: 17.02.2026

Revised: 26.03.2026

Accepted: 04.04.2026

Оценка степени нарушенности образцов каменной соли при их циклическом деформировании (по данным терморациметрических измерений)

Д. И. Блохин[✉], Е. Б. Черепецкая

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва,
Российская Федерация
[✉] dblokhin@yandex.ru

Резюме. Исследуется возможность получения информации о росте нарушенности геоматериалов, вызванном интенсификацией протекающих в них деформационных процессов, по вариациям интенсивности сопутствующего ИК-излучения. Представлены результаты экспериментов по регистрации теплового излучения с поверхности образцов каменной соли при близких к предельным режимам периодического нагружения в условиях одноосного сжатия. Показана качественная идентичность записей механических параметров и вариаций ИК-излучения, характеризующих изменения напряженно-деформированного состояния испытываемых образцов горных пород. Установлено, что фиксируемые изменения угла наклона зависимостей интенсивности теплового излучения с поверхности образцов каменной соли от продольной деформации на участках роста нагрузки при высокоамплитудном периодическом воздействии подобны изменениям значений модуля деформации E , рассчитываемых аналогичным образом на соответствующих участках диаграмм напряжение – деформация. Сделан вывод о возможности использования результатов бесконтактных терморациметрических измерений, а именно данных об изменениях значений угла наклона указанных кривых в качестве индикатора степени нарушенности геоматериалов.

Ключевые слова: геоматериалы, циклическое нагружение, напряжения, деформации, нарушенность, тепловое излучение

Для цитирования: Блохин Д.И., Черепецкая Е.Б. Оценка степени нарушенности образцов каменной соли при их циклическом деформировании (по данным терморациметрических измерений). *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 47-52. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-47-52>.

Assessment of the degree of damage to rock salt samples during their cyclic deformation (based on thermoradiation measurements)

D. I. Blokhin[✉], E. B. Cherepetskaya

National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation
[✉] dblokhin@yandex.ru

Abstract. The possibility of obtaining information on the increase in disturbance of geomaterials caused by the intensification of deformation processes occurring in them is investigated by variations in the intensity of concomitant IR radiation. The results of experiments on the registration of thermal radiation from the surface of rock salt samples under conditions of uniaxial compression close to the limit conditions of periodic loading are presented. The qualitative identity of the recordings of mechanical parameters and variations of IR radiation characterizing changes in the stress-strain state of the tested rock samples is shown. It has been established that the recorded changes in the angle of inclination of the dependences of the intensity of thermal radiation from the surface of rock salt samples on longitudinal deformation in areas of load growth under high-amplitude periodic exposure are similar to changes in the values of the deformation modulus E , calculated in the same way in the corresponding sections of the stress-strain diagrams. It is concluded that it is possible to use the results of non-contact thermoradiometric measurements, namely, data on changes in the angle of inclination of these curves as an indicator of the degree of disturbance of geomaterials.

Keywords: geomaterials, cyclic loading, stresses, deformations, disturbance, thermal radiation

For citation: Blokhin D.I., Cherepetskaya E.B. Assessment of the degree of damage to rock salt samples during their cyclic deformation (based on thermoradiation measurements). *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 47-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-47-52>.

Введение

В настоящее время одним из эффективных способов хранения газообразных и жидких углеводородов является устройство хранилищ в массивах каменной соли [1]. В процессе циклической эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) происходят существенные изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива каменной соли, которые могут привести к повышению его нарушенности, что, в свою очередь, увеличивает вероятность миграции хранимого продукта [2]. Этим определяется актуальность лабораторных и натурных экспериментов, направленных на разработку способов, позволяющих оценивать изменения механического состояния и степень нарушенности геоматериалов (в том числе и каменной соли), подвергаемых циклическому деформированию.

Известно [3, 4], что в процессе циклического нагружения геоматериалов происходят значительные изменения их механического состояния, фиксируемые в том числе и по изменениям характера зависимостей напряжение – деформация, соответствующих различным циклам. Следует отметить, что для разных геоматериалов указанные трансформации имеют отличительные особенности [3–6]. Подобные изменения механических свойств материалов отражаются в сопутствующих процессам деформирования изменениях измеряемых параметров физических полей [7, 8], на основе которых разработан целый ряд методов геоконтроля [9].

Одним из таких активно развивающихся методов является оценка геомеханического состояния породных массивов по данным об изменениях регистрируемых параметров электромагнитных сигналов инфракрасного диапазона (ИК-радиометрия) [10–12]. 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.

Однако в указанных работах предполагается использование терморациметрических измерений применительно к модели геоматериала как однородного упругого тела. Между тем такие бесконтактные измерения могут оказаться надежным инструментом выявления и количественной оценки параметров нарушенности геоматериалов [13–15], что, несомненно, открывает новые возможности эффективного использования ИК-радиометрии.

Цель исследований: установление влияния физико-механических свойств геоматериалов и условий их деформирования на параметры сигналов сопутствующего теплового (ИК-) излучения.

Материал и методы исследования

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

Так же, как и в [10, 16], в качестве первичного приемника ИК-излучения используется детектор РТН-31 [17], предназначенный для бесконтактного измерения изменений интенсивности оптического излучения в инфракрасном диапазоне частот. Датчик ИК-излучения (1) устанавливается примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0,5–1 см от его поверхности.

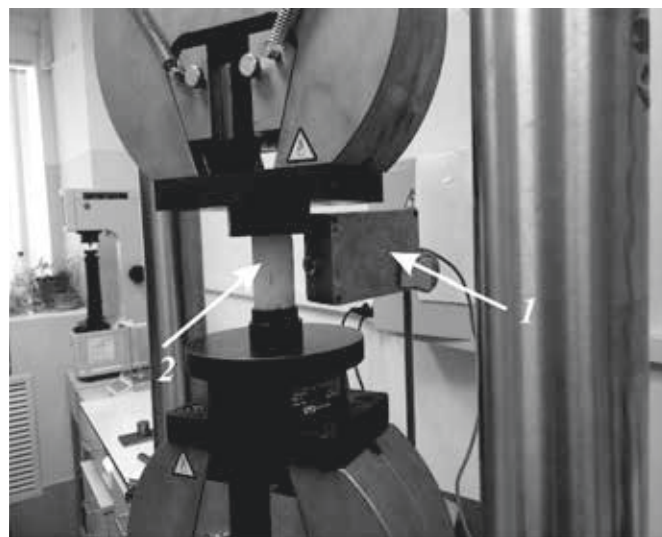


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – ИК-радиометр; 2 – образец каменной соли /
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand:
1 – IR radiometer; 2 – rock salt sample

Измерения выполнялись на испытательной машине Instron 150LX с помощью автоматизированного комплекса, позволяющего вести синхронную регистрацию механических и термоэмиссионных параметров [10, 16]. В экспериментах скорость изменения осевой деформации $d\epsilon_1 / dt$ на участках нагружения и разгрузки поддерживалась постоянной по абсолютной величине. Выбор значений $d\epsilon_1 / dt$, обеспечивающих «квазиadiaбатичность» деформирования, основан на результатах проведенных ранее экспериментов [16].

В описываемом «типовом» эксперименте на каждом цикле нагружение – разгрузка нагрузка возрастала до значения $\sigma_{max} \approx 18$ МПа, после чего осуществлялась его разгрузка до значения, при котором $\sigma_1 \approx 0,1$ МПа.

Предел прочности на одноосное сжатие σ_c подвергаемых многоцикловым испытаниям образцов каменной соли с учетом данных прочностных одноцикловых испытаний образцов из той же серии принят составляющим около 20 МПа. Выбор отношения $\sigma_{max} / \sigma_c = 0,9$ соответствует относительному максимальному уровню напряжений, принимаемому в лабораторных исследованиях по моделированию влияния циклических многократных нагружений на устойчивость подземных газохранилищ [18]. Отметим, что σ_{max} значительно превосходит предел упругости $\sigma_e \approx 10$ –12 МПа, характерный для исследуемых образцов каменной соли [16] при однократном испытании.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены кривые изменения во времени осевого напряжения $\sigma_1(t)$ (1), осевой деформации $\epsilon_1(t)$ (2) и интенсивности ИК-излучения $V(t)$ (3) при деформировании образца в условиях последовательных циклов нагружение – разгрузка ($|d\epsilon_1| = const = 3$ мм/мин) при постоянном значении амплитуды нагрузки. Разрушение образца при указанной амплитуде изменения напряжений произошло на восьмом цикле.

Более наглядно особенности рассматриваемого процесса циклического деформирования могут быть представлены в координатах осевое напряжение – осевая деформация. Диаграмма $\sigma_1(\epsilon_1)$ для рассматриваемого образца показана на

рисунке 3, где отчетливо прослеживается изменение наклона соответствующих упругой стадии деформирования «линейных» участков графиков, что указывает на уменьшение жесткости геоматериала (модуля деформации E) с увеличением номера цикла нагружения. Такая особенность диаграмм $\sigma_1(\epsilon_1)$ наблюдается для многих типов грунтов и горных пород, подвергаемых циклическому деформированию [13, 14].

Похожим образом ведет себя и соответствующая рассмотренной диаграмме $\sigma_1(\epsilon_1)$ зависимость $V(\epsilon_1)$, представленная на рисунке 4, по которой также визуальным образом прослеживается заметное изменение на каждом цикле угла наклонов аналогичных участков графика.

Для детализации и уточнения факта такой трансформации кривых на рисунке 5 для циклов с $n = 3-8$ приведены обозначенные 1 зависимости $\sigma_1(\epsilon_1)$, характеризующие процесс деформирования в режиме нагружения, и соответствующие кривые $V(\epsilon_1)$, обозначенные 2.

В настоящее время одним из общепризнанных способов оценки поврежденности материалов является метод, основанный на зависимости жесткости материала от его нарушенности [19].

В простейшем случае дефектность материала характеризуется параметром (поврежденностью) D , определяемым по формуле:

$$D = 1 - (E/E_0), \quad (1)$$

где E_0 – модуль упругости ненарушенного геоматериала,

E – модуль деформации материала со структурными нарушениями.

Поэтому, определив тангенс угла наклона соответствующих участков зависимостей $\sigma_1(\epsilon_1)$ или $V(\epsilon_1)$, мы можем получить зависимость жесткости испытываемого образца от номера цикла нагружения и тем самым проследить динамику поврежденности материала.

На рисунке 6а приведена зависимость определяемого по графику $\sigma_1(\epsilon_1)$ изменения модуля $E = \Delta\sigma_1 / \Delta\epsilon_1$ от номера цикла нагружения n , а на рисунке 6б – зависимость изменения коэффициента $k = \Delta V / \Delta\epsilon_1$, определяемого аналогичным образом по графику $V(\epsilon_1)$.

Как видно из рисунка 6а, значение модуля E образца каменной соли возрастает после первого цикла деформирования, что связано с упрочнением материала. Далее зависимость $E(n)$ полого спадает с ростом номера n цикла нагружения – разгрузка. Такое изменение деформационных свойств испытываемого образца вполне согласуется с данными многочисленных исследований усталостного поведения геоматериалов [3, 20, 21]. Аналогично ведет себя и коэффициент k , зависимость которого от номера цикла n представлена на рисунке 6б.

Выводы

1. В статье описаны результаты экспериментов по исследованию ИК-излучения с поверхности образцов каменной соли, подвергаемых циклическому нагружению в условиях одноосного сжатия. Особенностью описываемых исследований является синхронная регистрация изменений интенсивности ИК-излучения и деформационно-прочностных характеристик испытываемых образцов горных пород. Качественно продемонстрирована корреляция фиксируемых

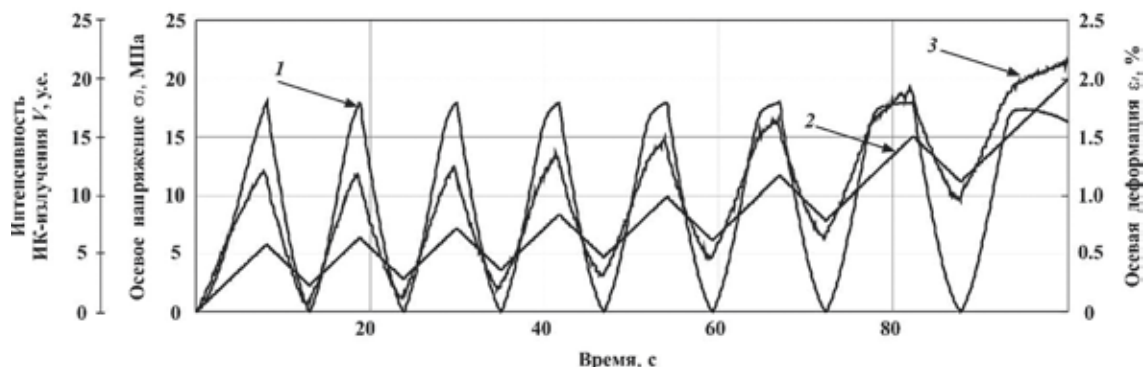


Рис. 2. Зависимости осевого напряжения $\sigma_1(t)$ (1), осевой деформации $\epsilon_1(t)$ (2) и интенсивности ИК-излучения $V(t)$ (3) от времени при $d\epsilon_1/dt = \text{const} = 3 \text{ мм/мин}$ /

Fig. 2. Dependences of axial stress $\sigma_1(t)$ (1), axial deformation $\epsilon_1(t)$ (2) and IR radiation intensity $V(t)$ (3) on time at $d\epsilon_1/dt = \text{const} = 3 \text{ мм/мин}$

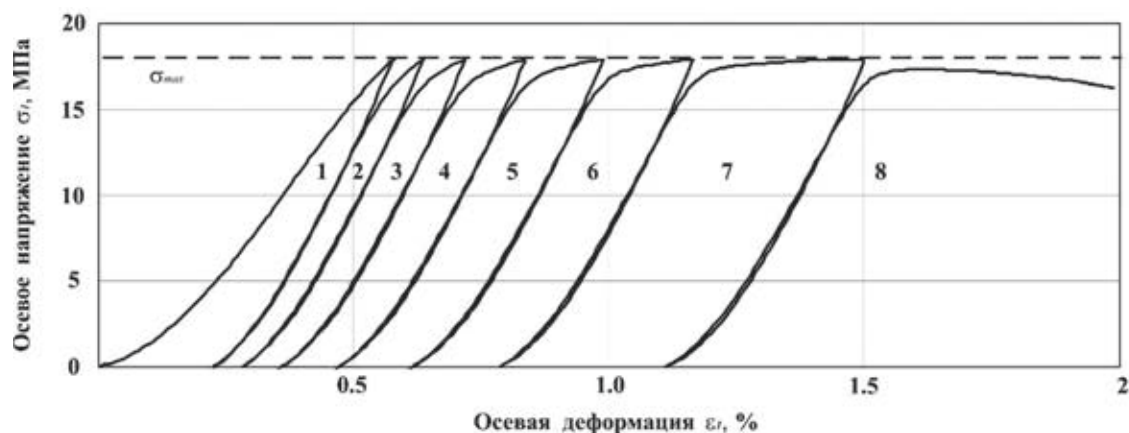


Рис. 3. Диаграмма $\sigma_1(\epsilon_1)$: 1-8 – номера циклов /

Fig. 3. Diagram $\sigma_1(\epsilon_1)$: 1-8 – cycle numbers

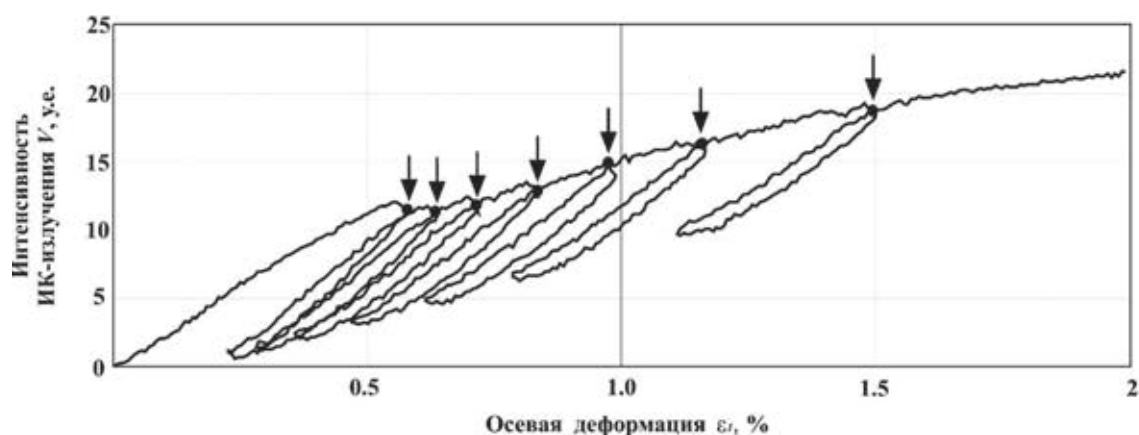


Рис. 4. Зависимость $V(\varepsilon_1)$ / Fig. 4. Dependence $V(\varepsilon_1)$

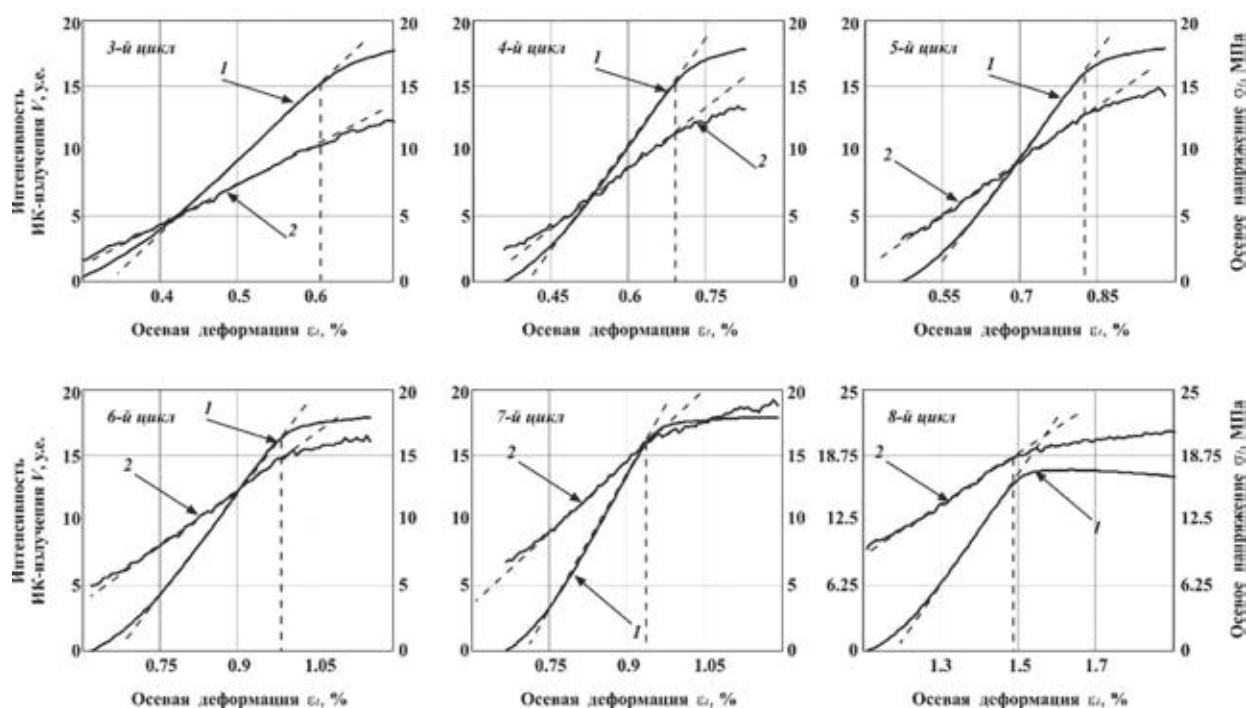


Рис. 5. Зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)(1)$ и $V(\varepsilon_1)(2)$ для участков нагружения, соответствующих циклам с $n = 3-8$ / Fig. 5. Dependencies $\sigma_1(\varepsilon_1)(1)$ and $V(\varepsilon_1)(2)$ for loading sections corresponding to cycles with $n = 3-8$

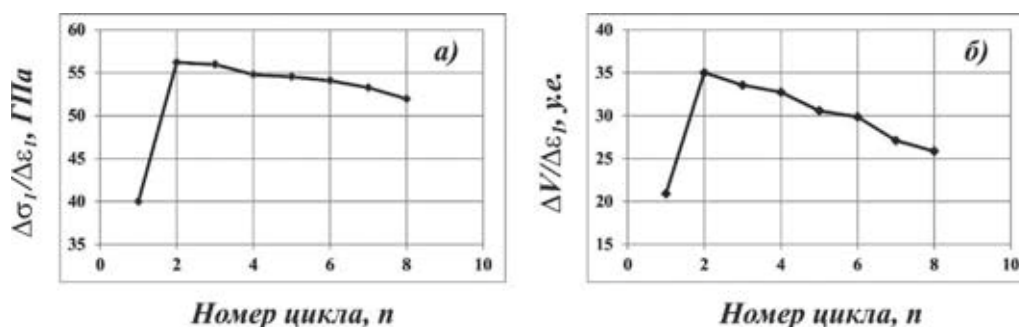


Рис. 6. Зависимости $E(n)$ (a) и $k(n)$ (б) / Fig. 6. Dependencies $E(n)$ (a) and $k(n)$ (b)

изменений механических величин и параметров, характеризующих вариации ИК-излучения при описываемых режимах циклических испытаний.

2. Показано, что значения введенного коэффициента k , определяемого по зависимостям изменений интенсивности инфракрасного излучения от продольной деформации и являющегося аналогией модуля деформации E , умень-

шаются с ростом номера n цикла нагружения – разгрузки.

3. Выявленная идентичность между зависимостями $E(n)$ и $k(n)$ указывает на принципиальную возможность реализации использования данных бесконтактных терморadioионных измерений для оценки степени поврежденности образцов каменной соли, а в перспективе и породных массивов, включающих подземные выработки, в том числе и ПХГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сильвестров Л.К. Базовые принципы подземного хранения жидкостей и газов. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2006; (5): 36-39. Silvestrov L.K. Basic Principles of Underground Storage of Liquids and Gases. *Energy: Economics, Technology, and Ecology*. 2006; (5): 36-39. (In Russ.).
2. Богданов Ю.М., Журавлева Т.Ю., Сильверстов Л.К. и др. Результаты исследования геомеханических процессов при закачке и отборе газа на ПХГ в каменной соли. *Газовая промышленность*. 2010; (6): 72-75. Bogdanov Yu.M., Zhuravleva T.Yu., Silverstov L.K., et al. Results of the study of geomechanical processes during gas injection and extraction at UGS in rock salt. *Gas Industry*. 2010; (6): 72-75. (In Russ.).
3. Мохначев М.П. Усталость горных пород. Москва, 1979: 152. Mokhnachev M.P. Rock Fatigue. Moscow, 1979: 152. (In Russ.).
4. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. Москва, 1999: 264. Voznesensky E.A. Dynamic Instability of Soil. Moscow, 1999: 264. (In Russ.).
5. Fuenkajorn K., Phueakphum D. Effects of Cyclic Loading on Mechanical Properties of Maha Sarakham Salt. *Engineering Geology*. 2010, 112 (1): 43-52.
6. Высотин Н.Г. Нелинейные особенности упругого гистерезиса образцов горных пород при циклическом одноосном нагружении. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; (4-1): 148-157. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_41_0_148. Vysotin N.G. The specific non-linear elastic hysteresis of rocks under cyclic uniaxial tension. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; (4-1): 148-157. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_41_0_148.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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.).
10. 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>.
11. Cao K., Ma L., Wu Y., et al. Cyclic fatigue characteristics of rock failure using infrared radiation as precursor to violent failure: Experimental insights from loading and unloading response. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2021; 44: 584-594. <https://doi.org/10.1111/ffe.13362>.
12. Huang J., Yu M., Zhang C. 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>.
13. Balueva M.A., Blokhin D.I., Savatorova V.L., et al. Simulation of microcrack influence on temperature variations within geomaterials under deformation. *Journal of Mining Science*. 2009; (4) 6: 576-580. <https://doi.org/10.1007/s10913-009-0072-z>.
14. Sun H., Zhu H.-Y., Han J., et al. Energy and Infrared Radiation Characteristics of the Sandstone Damage Evolution Process. *Materials*. 2023; 16 (12): 4342. <https://doi.org/10.3390/ma16124342>.
15. Liu W., Ma L., Gao Q., et al. Fracture Precursor Recognition and Damage Quantitative Characterization of Stressed Rock Using Infrared Radiation. *Rock Mech. Rock Eng*. 2023; 56: 5567-5584. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03344-w>.
16. Sheinin V.I., Blokhin D.I. Features of thermomechanical effects in rock salt samples under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*. 2012; 48 (1): 39-45. <https://doi.org/10.1134/S1062739148010054>.
17. 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.).
18. Guo Y.T., Zhao K.L., Sun G.H., et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading. *Rock and Soil Mechanics*. 2011; 32(5): 1353-1359.
19. Liu J., Xie H., Hou Z., et al. Damage evolution of rock salt under cyclic loading in uniaxial tests. *Acta Geotechnica*. 2014; 9 (1): 153-160. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0236-5>.
20. Zhou T., Qin Y., Cheng J., et al. Study on Damage Evolution Model of Sandstone under Triaxial Loading and Postpeak Unloading Considering Nonlinear Behaviors. *Geofluids*. 2021; 2395789. <https://doi.org/10.1155/2021/2395789>.
21. Zhao Y., Li Q., Zhang K. et al. Effect of fissure angle on energy evolution and failure characteristics of fractured rock under uniaxial cyclic loading. *Scientific Reports*. 2023; (13): 2678. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26091-4>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Иванович Блохин –

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

Елена Борисовна Черепецкая –

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9642-2149>

Критерии авторства:

Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.02.2026

Поступила после рецензирования: 27.03.2026

Принята к публикации: 09.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Dmitry I. Blokhin –

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

Elena B. Cherepetskaya –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Physical Processes in Mining and Geological Control, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9642-2149>

Contribution:

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

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 16.02.2026

Revised: 27.03.2026

Accepted: 09.04.2026

Маркшейдерское обеспечение подземной разработки месторождений камерно-столбовой системой с твердеющей закладкой (на примере месторождения Майское)

В. В. Арно^{1✉}, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифулина¹,
Н. А. Ремизов¹

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

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

✉ vvnika@mail.ru

Резюме. Рассматривается опыт маркшейдерского обеспечения подземной разработки золотосеребряного месторождения Майское (Чукотский автономный округ) камерно-столбовой системой с твердеющей закладкой выработанного пространства. Представлены методы определения параметров камер и целиков, система маркшейдерского контроля движения запасов, расчет показателей потерь и разубоживания руды. Обоснованы геометрические параметры системы разработки для различных горизонтов от -40 до -340 м. Проведен анализ эффективности применяемой технологии при производственной мощности 850 тыс. тонн руды в год. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации подземных рудников с аналогичными горно-геологическими условиями.

Ключевые слова: маркшейдерия, камерно-столбовая система разработки, твердеющая закладка, параметры камер и целиков, потери и разубоживание, месторождение Майское, подземная добыча

Благодарности, признательность: Авторы признательны компании АО «Полиметалл» за содействие в организации исследований, предоставление данных и ценные экспертные комментарии. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Ремизов Н.А. Маркшейдерское обеспечение подземной разработки месторождений камерно-столбовой системой с твердеющей закладкой (на примере месторождения Майское). *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 53-58. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-53-58>.

Mine Surveying Support for Underground Mining Using the Room-and-Pillar System with Hardening Backfill (Case Study of the Mayskoye Deposit)

V. V. Arno^{1✉}, E. P. Kolesnichenko², I. Y. Garifulina¹,
N. A. Remizov¹

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

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

✉ vvnika@mail.ru

Abstract. The article discusses the experience of mine surveying support for underground mining of the Mayskoye gold-silver deposit (Magadan Region) using a room-and-pillar system with hardening backfilling of the worked-out space. The methods for determining the parameters of rooms and pillars, the system of mine surveying control of stockpile movement, and the calculation of ore loss and dilution indicators are presented. The geometric parameters of the mining system for various horizons from -40 to -340 m are substantiated. The efficiency of the applied technology was analyzed at a production capacity of 850 thousand tons of ore per year. The results of the study can be used in the design and operation of underground mines with similar mining and geological conditions.

Keywords: mine surveying, chamber-pillar mining system, hardening filling, parameters of chambers and pillars, losses and dilution, Maiskoye deposit, underground mining

Acknowledgments: The authors are grateful to Polymetal JSC for their assistance in organizing the research, providing data, and valuable expert comments. The research was funded by the authors.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Y., Remizov N.A. Mine Surveying Support for Underground Mining Using the Room-and-Pillar System with Hardening Backfill (Case Study of the Maiskoye Deposit). *Mine Surveying and Subsurface Use* 2026; 26 (2): 53-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-53-58>.

Введение

Камерно-столбовая система разработки (далее КССР) с твердеющей закладкой выработанного пространства является одной из наиболее эффективных технологий отработки крутопадающих рудных месторождений средней и большой мощности [1–3]. Применение данной системы позволяет обеспечить высокие показатели извлечения полезного ископаемого при соблюдении требований безопасности и устойчивости горных выработок [2–4].

Маркшейдерское обеспечение при использовании КССР играет ключевую роль в определении и контроле геометрических параметров системы разработки, учете движения запасов, оценке полноты извлечения руды из недр [3–5]. Особую важность приобретает точное определение размеров камер и междукamerных целиков, обеспечивающих устойчивость конструкции при различных глубинах разработки.

Месторождение Майское, расположенное в Чаунском районе Чукотского автономного округа, обрабатывается АО «Полиметалл» по лицензии МАГ 12929 ТЭ (срок действия – до 31.12.2044) [1–3]. Месторождение характеризуется крутым падением рудных тел (углы падения – 70–80°), мощностью от 3 до 15 м, средним содержанием золота – 5,39 г/т и серебра – 7,7 г/т. Разработка ведется на горизонтах от +200 до -340 м с проектируемым углублением до -460 м.

Проектная производственная мощность месторождения составляет 850 тыс. тонн руды в год с извлечением золота в концентрат 88,3 % и серебра 62 %. Применяется камерно-столбовая система разработки с послонной выемкой и твердеющей закладкой камер, что обусловлено горно-геологическими условиями и требованиями максимального извлечения запасов.

Цель исследования: обобщение опыта маркшейдерского обеспечения подземной разработки месторождения Майское, анализ применяемых методов определения параметров системы разработки и оценка эффективности маркшейдерского контроля.

Материал и методы исследования

Исследование проводилось на базе месторождения Майское в период 2023–2024 годов. Отработка месторождения осуществляется на основных горизонтах (+200, +140, -40, -100, -160, -220, -280, -340 м) и проектируемых горизонтах -400 и -460 м [1]. Рудные тела были представлены жилами крутого падения северо-западного простирания.

Геологические запасы месторождения по состоянию на 01.01.2024 составляли:

- балансовые запасы руды – 4 047,571 тыс. тонн;
- среднее содержание Au – 5,39 г/т;
- среднее содержание Ag – 7,7 г/т;
- запасы металла Au – 21 816 кг (701 тыс. унций);
- запасы металла Ag – 311 662 кг (10 019 тыс. унций).

Для обеспечения маркшейдерского контроля применялись нижеуказанные методы и технологии.

Определение параметров камер и целиков

Расчет предельных пролетов камер выполнялся по методике, основанной на теории балок на упругом основании с учетом характеристик прочности вмещающих пород.

Устойчивость кровли определялась по формуле 1 [5–7]

$$L_{\max} = k \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{\gamma \cdot H}}, \quad (1)$$

где $L_{\max}$ – максимальный допустимый пролет камеры, м;

k – коэффициент запаса прочности (принят 0,7–0,8);

E – модуль упругости пород кровли, МПа;

h – мощность устойчивой толщи пород кровли, м;

γ – объемный вес пород, т/м³;

H – глубина разработки от поверхности, м.

Ширина междукamerных целиков рассчитывалась исходя из условия обеспечения их несущей способности по формуле [6–8]

$$B_{\text{ц}} = m \cdot k_{\text{зап}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot H \cdot (B_{\text{к}} + B_{\text{ц}})}{\sigma_{\text{сж}}}}, \quad (2)$$

где $B_{\text{ц}}$ – ширина целика, м;

$B_{\text{к}}$ – ширина камеры, м;

m – мощность рудного тела, м;

$k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса прочности (1,5–2,0);

$\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности руды на сжатие, МПа.

Маркшейдерский учет движения запасов

Учет движения запасов осуществлялся методом горизонтальных сечений с использованием программного обеспечения Micromine. Проводилась ежемесячная съемка фактического положения очистных забоев с точностью позиционирования ±0,1 м. Объемы погашенных запасов определялись методом вертикальных разрезов с шагом 10–20 м по простиранию рудных тел.

Определение показателей потерь и разубоживания

Фактические потери руды $P_{\text{факт}}$ определялись по формуле [5–7]

$$P_{\text{факт}} = \frac{Q_{\text{баланс}} - Q_{\text{добыто}}}{Q_{\text{баланс}}} \times 100 \%, \quad (3)$$

где $Q_{\text{баланс}}$ – балансовые запасы в контуре очистной выемки, т;

$Q_{\text{добыто}}$ – фактически добытая руда, т.

Разубоживание руды $P_{\text{факт}}$ трассировалось как [7–9]

$$P_{\text{факт}} = \frac{V_{\text{пор}} - V_{\text{руд}}}{V_{\text{пор}}} \times 100 \%, \quad (4)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объем горной массы, выданной на поверхность, м³;

$V_{\text{руд}}$ – объем чистой руды в добытой горной массе, м³.

Инструментальное обеспечение

Для маркшейдерских работ использовалось следующее оборудование:

- тахеометры электронные Leica TS06plus, Leica TS02plus;
- лазерные дальномеры Leica Disto D810;
- система подземного позиционирования на базе технологии Leica iCON;
- программные комплексы Micromine, AutoCAD, Surpac;
- система наблюдений.

Таблица 1 / Table 1

**Геометрические параметры
камерно-столбовой системы разработки /
Geometric parameters of the chamber-pillar development system**

Горизонт, м / Level, m	Ширина камеры, м / Chamber width, m	Ширина целика, м / Pillar width, m	Высота слоя, м / Layer height, m	Коэффициент извлечения / Extraction ratio	Глубина от поверхности, м / Depth from surface, m
+200 до +250	12–16	8–10	3,0–4,0	0,60–0,65	50–100
+140 до +200	12–16	8–10	3,0–4,0	0,60–0,65	100–160
+20 до +80	10–14	8–10	3,0–3,5	0,55–0,60	220–280
-40 до +20	10–14	8–12	3,0–3,5	0,50–0,55	280–340
-100 до -40	10–12	10–12	2,5–3,0	0,45–0,50	340–400
-160 до -100	8–12	10–14	2,5–3,0	0,40–0,45	400–460
-220 до -160	8–12	12–16	2,5–3,0	0,35–0,40	460–520
-280 до -220	8–10	14–18	2,0–2,5	0,30–0,35	520–580
-340 до -280	6–10	16–20	2,0–2,5	0,25–0,30	580–640

Анализ данных показывает закономерное снижение ширины камер и увеличение ширины междуканальных целиков с увеличением глубины разработки, что обусловлено возрастанием горного давления. Коэффициент извлечения руды снижается с 0,60–0,65 на верхних горизонтах до 0,25–0,30 на проектируемых глубоких горизонтах (-340 м и глубже).

В период 2023–2024 годов было отработано фактически 34 очистных блока на различных горизонтах месторождения. Фактические геометрические параметры отработанных блоков представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Фактические параметры отработанных блоков в 2023–2024 годах /
Actual parameters of spent units in 2023–2024**

Блок / Block	Объем, тыс. м ³ / Volume, thous. m ³	Содержание Au, г/т / Au grade, g/t	Ср. мощность, м / Avg. thickness, m
Блок-1 (300–350 м)	88,3	5,6	31,4
Блок-2 (250–300 м)	118,5	2,9	29,6
Блок-3 (250–300 м)	250,1	3,0	27,8
Блок-4 (200–250 м)	569,7	3,4	30,3
Блок-5 (140–200 м)	723,3	3,1	33,0
Блок-6 (80–140 м)	552,8	2,8	30,8
Блок-7 (20–80 м)	764,4	2,6	28,8
Блок-8 (-40–20 м)	876,1	9,1	29,8
Блок-9 (-100 до -40 м)	984,5	10,6	32,0
Блок-10 (-160 до -100 м)	1106,9	9,2	29,5
Блок-11 (-220 до -160 м)	1101,4	5,5	27,8

Суммарный объем отработанных запасов за анализируемый период составил 11 342,5 тыс. м³ при среднем содержании золота 5,39 г/т [1–4].

Маркшейдерский учет позволил установить фактические показатели потерь и разубоживания руды по горизонтам разработки (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Фактические показатели потерь и разубоживания руды
на различных горизонтах (2024 г.), % /
Actual ore loss and dilution rates at various horizons (2024), %**

Горизонт / Level	Потери фактические / Actual losses	Норматив потерь / Standard losses	Разубоживание фактическое / Actual dilution	Норматив разубоживания / Standard dilution
Блок-4 (200–250 м)	3,35	3,40	-	-
Блок-5 (140–200 м)	3,09	3,10	-	-
Блок-7 (20–80 м)	2,24	2,60	-	-
Блок-8 (-40–20 м)	5,85	9,10	-	-
Блок-9 (-100 до -40 м)	9,09	9,10	-	-
Блок-10 (-160 до -100 м)	10,58	10,60	-	-
Среднее по месторождению / Average for deposit	5,70	6,32	8,29	8,50

Фактические потери руды по месторождению составили 5,70 %, что на 0,62 % ниже нормативного значения 6,32 % [4]. Разубоживание руды составило 8,29 % при нормативе 8,50 % [4]. Полученные показатели свидетельствуют о высоком качестве маркшейдерского обеспечения и точности контроля параметров системы разработки.

За 2024 год на месторождении Майское было добыто 850 тыс. тонн руды при проектной мощности 850 тыс. т/год [1–3]. Среднее содержание золота в добытой руде составило 5,39 г/т, серебра – 7,7 г/т, что соответствует проектным значениям.

Оценка точности маркшейдерских измерений проводилась по результатам контрольных съемок и сравнения планового и фактического объемов выработанного пространства [10–13].

Средняя квадратическая погрешность определения координат точек в подземных выработках составила $m_{xy} = \pm 0,08$ м, $m_z = \pm 0,05$ м.

Расхождение между плановыми и фактическими объемами выработанного пространства не превышало 2,5 %, что соответствует требованиям инструкции по производству маркшейдерских работ [1, 8–11].

Точность определения содержаний полезных компонентов по результатам опробования:

$$\Delta C_{Au} = \pm 0,15 \text{ г/т (при } C_{Au} = 5,39 \text{ г/т)},$$

$$\Delta C_{Ag} = \pm 0,3 \text{ г/т (при } C_{Ag} = 7,7 \text{ г/т)}.$$

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают эффективность применения камерно-столбовой системы разработки с твердеющей закладкой на месторождении Майское.

Анализ данных показывает, что с увеличением глубины разработки от +200 до -340 м наблюдается закономерное изменение геометрических параметров КССР:

– ширина камер уменьшается с 12–16 м на верхних горизонтах до 6–10 м на глубоких горизонтах (снижение на 37–47 %);

– ширина междуканальных целиков увеличивается с 8–10 м до 16–20 м (увеличение в 2,0–2,5 раза);

– коэффициент извлечения снижается с 0,60–0,65 до 0,25–0,30 (снижение в 2,0–2,6 раза).

Данные тенденции обусловлены возрастанием горного давления пропорционально глубине разработки.

Эмпирическая зависимость ширины камер от глубины разработки может быть представлена в виде

$$B_k = B_{k0} - k_H \cdot H, \quad (5)$$

где B_{k0} – ширина камеры на поверхности (16 м);

k_H – коэффициент влияния глубины (0,015–0,020 м/м);

H – глубина разработки, м.

Для условий месторождения Майское установлено, что оптимальная ширина междуканальных целиков должна обеспечивать запас прочности не менее 1,5–2,0 относительно расчетных напряжений. При этом отношение ширины целика к ширине камеры изменяется от 0,6–0,8 на верхних горизонтах до 1,8–2,5 на глубоких горизонтах.

Применение современных методов маркшейдерского обеспечения позволило достичь следующих результатов:

– *снижения потерь руды*. Фактические потери составили 5,70 % против нормативных 6,32 %, что дает экономию 5 280 тонн руды в год при производительности 850 тыс. т/год. При среднем содержании золота 5,39 г/т это соответствует дополнительному извлечению 28,5 кг золота в год;

– *контроля разубоживания*. Фактическое разубоживание 8,29 % ниже норматива на 0,21 %, что обеспечивает повышение качества добываемой руды и снижение затрат на обогащение;

– *точности подсчета запасов*. Расхождение между плановыми и фактическими объемами не превышает 2,5 %, что обеспечивает надежное планирование горных работ и достоверность геологической информации [10–13].

Экономический эффект от точного маркшейдерского контроля может быть оценен как

$$\mathcal{E} = (Q_{\text{год}} \cdot \Delta\Pi \cdot C_{\text{Au}} \cdot C_{\text{Au}} \cdot k_{\text{изв}}) - Z_{\text{марк}} \quad (6)$$

где $\mathcal{E}$ – экономический эффект, руб/год;

$Q_{\text{год}}$ – годовая производительность, т/год (850 тыс.);

$\Delta\Pi$ – снижение потерь, доли ед. (0,0062);

C_{Au} – содержание золота, г/т (5,39);

C_{Au} – цена золота, руб/г (примерно 5 500 руб/г);

$k_{\text{изв}}$ – коэффициент извлечения на фабрике (0,883);

$Z_{\text{марк}}$ – затраты на маркшейдерское обеспечение, руб/год.

При указанных параметрах экономический эффект составляет:

$$\mathcal{E} = 850000 \cdot 0,0062 \cdot 5,39 \cdot 5500 \cdot 0,883 - Z_{\text{марк}} \approx 138,5 \text{ млн руб/год.}$$

Сравнение с другими месторождениями

Полученные показатели сопоставимы с результатами других золоторудных месторождений России, отрабатываемых камерно-столбовой системой с твердеющей закладкой выработанного пространства [9].

Месторождение Олимпиада (Красноярский край): потери – 6,5–7,0 %, разубоживание – 9–11 %.

Месторождение Вернинское (Бодайбо): потери – 7,5–8,5 %, разубоживание – 10–13 %.

Месторождение Светлое (Хабаровский край): потери – 6,0–6,5 %, разубоживание – 8–10 %.

Месторождение Майское демонстрирует лучшие показатели в группе аналогичных объектов, что подтверждает высокую эффективность применяемой системы маркшейдерского обеспечения.

Ограничения исследования

При интерпретации результатов необходимо учитывать следующие ограничения.

Результаты получены для конкретных горно-геологических условий месторождения Майское и могут отличаться для других объектов [14–15]. Расчетные формулы параметров камер и целиков являются приближенными и требуют корректировки для каждого конкретного месторождения. Не учтено влияние тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости на устойчивость выработок [14–15].

Анализ проведен за период двух лет, для более точных выводов требуются долгосрочные наблюдения.

Перспективы развития

Дальнейшее совершенствование маркшейдерского обеспечения на месторождении Майское связано с внедрением следующих технологий:

– систем непрерывного мониторинга деформаций горного массива с использованием датчиков и автоматизированных измерительных станций;

– 3D-моделирования напряженно-деформированного состояния массива методом конечных элементов для прогнозирования устойчивости целиков;

– технологий лазерного сканирования выработанного пространства для высокоточного определения объемов;

– систем позиционирования горного оборудования в реальном времени для автоматизированного учета добычи;

– интеграции маркшейдерских данных с системами планирования горных работ в единую цифровую платформу.

Заключение

На основе проведенного исследования маркшейдерского обеспечения подземной разработки месторождения Майское камерно-столбовой системой с твердеющей закладкой можно сформулировать следующие выводы.

1. Установлены оптимальные геометрические параметры камерно-столбовой системы разработки для различных глубин: ширина камер изменяется от 12–16 м на верхних горизонтах (+200 м) до 6–10 м на глубоких горизонтах (–340 м), ширина междуканальных целиков увеличивается с 8–10 м до 16–20 м соответственно. Коэффициент извлечения руды снижается с 0,60–0,65 до 0,25–0,30 с увеличением глубины разработки.

2. Разработана и апробирована система маркшейдерского контроля движения запасов, обеспечивающая точность определения координат $\pm 0,08$ м в плане и $\pm 0,05$ м по высоте, расхождение между плановыми и фактическими объемами выработанного пространства не превышает 2,5 %.

3. Фактические потери руды на месторождении Майское составили 5,70 % при нормативе 6,32 %, разубоживание –

8,29 % при нормативе 8,50 %, что свидетельствует о высокой эффективности маркшейдерского обеспечения. Экономический эффект от снижения потерь оценивается в 138,5 млн руб/год.

4. Установлена эмпирическая зависимость основных параметров системы разработки от глубины: ширина камер уменьшается на 0,015–0,020 м на каждый метр глубины, ширина целиков увеличивается пропорционально квадратному корню из глубины разработки [11, 14–15].

5. При производственной мощности 850 тыс. тонн руды в год обеспечено достижение проектных показателей добычи при среднем содержании золота 5,39 г/т и серебра 7,7 г/т. Извлечение золота в концентрат составило 88,3 %, серебра – 62,0 %.

6. Применение современных методов маркшейдерского обеспечения с использованием электронных тахеометров, лазерных дальномеров, систем позиционирования и про-

граммных комплексов (Micromine, AutoCAD, Surpac) позволило повысить точность и оперативность получения информации о состоянии горных работ.

Выводы

1. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации подземных рудников с аналогичными горно-геологическими условиями: крутым падением рудных тел (70–80°), мощностью 3–15 м, глубиной разработки до 600 м, применением камерно-столбовой системы с твердеющей закладкой.

2. Перспективы дальнейших исследований связаны с внедрением систем непрерывного мониторинга деформаций горного массива, 3D-моделирования напряженно-деформированного состояния, технологий лазерного сканирования и интеграции маркшейдерских данных в единую цифровую платформу управления горными работами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифуллина И.Ю. и др. Анализ устойчивости междуэтажных и междуканальных целиков при камерной системе разработки месторождения «Майское». *Горная промышленность*. 2025; 4: 165-169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-165-169>.
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., et al. Analysis of the stability of sublevel and interchamber pillars under a room mining system at the Maiskoye deposit. *Mining Industry*. 2025; 4: 165-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-165-169>.
2. Барях А.А., Ломакин И.С., Самоделькина Н.А. и др. Оценка степени нагружения междуканальных целиков при отработке двух пластов на Верхнекамском месторождении солей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 1: 5–19. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2023-1-0-5>.
Baryakh A.A., Lomakin I.S., Samodelkina N.A., et al. Assessment of the loading degree of interchamber pillars during extraction of two seams at the Verkhnekamskoye salt deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 1: 5-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2023-1-0-5>.
3. Абрамкин Н.И., Дородний А.В., Бухарбаев И.У. Анализ интегрированной технологии высокопроизводительной отработки запасов выемочных участков угольных шахт. *Уголь*. 2019; 1: 40-45.
Abramkin N.I., Dorodnyy A.V., Bukharsbaev I.U. Analysis of an integrated highproductivity technology for mining reserves of coal mine panels. *Coal*. 2019; 1: 40-45. (In Russ.).
4. Нгуен В.Н., Фам Т.Н., Осинский П. и др. Обоснование параметров целиков при отработке наклонных угольных пластов в условиях шахт провинции Куангнинь Вьетнама. *Горные науки и технологии*. 2022; 7 (2): 93-99. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-93-99>.
Nguyen V.N., Pham T.N., Osinski P., et al. Justification of pillar parameters for mining inclined coal seams in the conditions of Quang Ninh Province mines (Vietnam). *Mining Science and Technology*. 2022; 7 (2) 93-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-93-99>.
5. Фам Д.Т., Виткалов В.Г., Агафонов В.В. и др. Обоснование рациональных вариантов технологии отработки наклонных угольных пластов средней мощности с использованием камерно-столбовой системы разработки бассейна Куангнинь. *Уголь*. 2018; 6: 27-31.
Pham D.T., Vitkalov V.G., Agafonov V.V., et al. Justification of rational technological options for mining mediumthickness inclined coal seams using the roomandpillar system in the Quang Ninh Basin. *Coal*. 2018; 6: 27-31. (In Russ.).
6. Pham D.T., Abraking N.I., Minh N.N. Efficient determination of gob-side pillar parameters in room-and-pillar mining of medium-thick and inclined coal beds: A case-study of the Quang Ninh Coal Basin, Vietnam. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026; 3: 49-61. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2026-3-0-49>.
7. Chu T.Q., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in Vietnam: Geological conditions and their influence on production sustainability indicators. *Sustainability*. 2021; 13 (21): 11800. <https://doi.org/10.3390/su132111800>.
8. Le T.D., Bui X.N. Status and prospects of underground coal mining technology in Vietnam. *Inżynieria Mineralna*. 2022; 2 (2). <https://doi.org/10.29227/IM-2019-02-63>.
9. Li C., Zhou J., Armaghani D.J., et al. Stability analysis of underground mine hard rock pillars via combination of finite difference methods, neural networks, and Monte Carlo simulation techniques. *Underground Space*. 2021; 6: 379-395.
10. Xia Z., Yao Q., Meng G., et al. Numerical study of stability of mining roadways with 6.0-m section coal pillars under influence of repeated mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021; 138: 104641.
11. Esterhuizen G.S., Gearhart D.F., Klemetti T. Analysis of monitored ground behavior at two longwall tailgates with varying pillar width and entry spans. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021; 31 (2): 193-204.
12. Gehrhart D., Esterhuizen G., Tulu I. Stress and displacement changes caused by panel retreat in longwall mines. *Proceedings of the 36th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, 2017: 313-320.
13. Esterhuizen G.S. Stability factor of supported mine workings calculated based on numerical model analysis. *Proceedings of the 31st International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, 2012: 9-16.
14. Sankovsky A.A., Aleksenko A.G., Nikiforov A.V. Practical experience analysis: super-imposed seams series mining at the Verkhnekamsk potassium-magnesium salts deposit applying room-and-pillar mining method. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018; 9 (6): 715-728.
15. Бакиров Ж.Б., Такишов А.А., Бакиров М.Ж. и др. Определение ширины целиков при камерной отработке рудного месторождения. *Труды университета*. 2021; 4 (85): 119-125. https://doi.org/10.52209/1609_1825_2021_4_119.
Bakirov Zh.B., Takishov A.A., Bakirov M.Zh., et al. Determination of the width of the pillars during the chamber mining of an ore deposit. *Proceedings of the University*. 2021; 4 (85): 119-125. (In Russ.). https://doi.org/10.52209/1609_1825_2021_4_119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –

доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан; Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –

студентка направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит», ВШГА МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Ирина Юрьевна Гарифулина –

кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

Никита Андреевич Ремизов –

студент направления подготовки «Горное дело», Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

Критерии авторства:

В. В. Арно – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; И. Ю. Гарифулина – оценка результатов и коррекция написанной работы; Е. П. Колесниченко, Н. А. Ремизов – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 01.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Geology and Mining, North-Eastern State University, 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, Moscow, Russian Federation

Irina Y. Garifulina –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Geology and Mining, North-Eastern State University, Magadan

Nikita A. Remizov –

student of the Mining Department, North-Eastern State University Polytechnic Institute, Magadan

Contribution:

V. V. Arno – research idea, formulation of the current paradigm conflict and new facts, and writing a scientific paper; I. Yu. Garifulina – evaluation of the results and correction of the written work; E. P. Kolesnichenko and N. A. Remizov – selection and collection of research materials.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 16.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 01.04.2026

Критерии и методы оценки экологической эффективности недропользования при устойчивом развитии

Ю. П. Галченко[✉], Е. Д. Якушева

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

Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация

✉ schtrek33@mail.ru

Резюме. Представлена новая методика количественной оценки экологической эффективности комплексного освоения недр с учетом ограничений и принципов устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса. Показано, что неуправляемое обострение экологического кризиса, порожденного системным антагонизмом между человеком и биосферой, в условиях очевидной необходимости сохранения природной среды как гарантии выживания будущих поколений постепенно меняет вектор развития общества в направлении повышения значимости экологического императива как в общих принципах, так и в локальных методах построения техносферы. Установлено, что опережающий рост экологических проблем в сфере недропользования связан не только с очевидным несоответствием между темпами потребления различных металлов и геологически обусловленным снижением доступности минеральных ресурсов недр, но и главным образом с полным отсутствием побудительных технико-экономических мотивов и биологически обоснованных стимулов поиска инновационных путей экологизации технологической парадигмы как техносферы в целом, так и недропользования в частности. Предложены теория и методология преодоления этих противоречий на основе замены сугубо монетарного подхода к оценке экологических последствий техногенного изменения недр на биологически значимые критерии и методы, соответствующие требованиям и ограничениям принятой ООН Концепцией устойчивого развития природы и общества и действующей экологической доктрины РФ.

Ключевые слова: освоение недр, экологический кризис, сохранение биоты, экологизация парадигмы, стимулирование, обоснование, методология, дифференцированные критерии, методики, недропользование, устойчивое развитие, экологическая эффективность

Финансирование: Статья написана в рамках базового бюджетного финансирования (FMMS-2024-0010).

Для цитирования: Галченко Ю.П., Якушева Е.Д. Критерии и методы оценки экологической эффективности недропользования при устойчивом развитии. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 59-64. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-59-64>.

Criteria and methods for assessing the environmental efficiency of subsurface use in a sustainable manner

Yu. P. Galchenko[✉], E. D. Yakusheva

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation

✉ schtrek33@mail.ru

Abstract. The article presents a new methodology for quantifying the environmental efficiency of integrated subsurface development, taking into account the limitations and principles of sustainable development of the mineral resource complex. It is shown that the uncontrollable aggravation of the ecological crisis generated by the systemic antagonism between man and the biosphere, in conditions of the obvious need to preserve the natural environment as a guarantee of the survival of future generations, gradually changes the vector of development of society in the direction of increasing the importance of the ecological imperative, both in general principles and in local methods of building the technosphere. It has been established that the outstripping growth of environmental problems in the field of subsurface use is associated not only with the obvious discrepancy between the rates of consumption of various metals and the geologically caused decrease in the availability of mineral resources of the subsurface, but also, mainly, with the complete absence of motivating technical and economic motives and biologically justified incentives to search for innovative ways of greening the technological paradigm of both the technosphere as a whole and subsurface use, in particular. A theory and methodology for overcoming

ing these contradictions are proposed based on replacing a purely monetary approach to assessing the environmental consequences of man-made changes in the subsurface with biologically relevant criteria and methods that meet the requirements and limitations of the UN Concept of Sustainable Development of Nature and Society and the current Environmental Doctrine of the Russian Federation.

Keywords: subsurface development, ecological crisis, biota conservation, ecologization of the paradigm, stimulation, justification, methodology, differentiated criteria, methods, subsurface use, sustainable development, environmental efficiency

Financial support: The article was written within the framework of basic budget financing (FMMS-2024-0010).

For citation: Galchenko Yu.P., Yakusheva E.D. Criteria and methods for assessing the environmental efficiency of subsurface use in a sustainable manner. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-59-64>.

Введение

Необратимое преобразование живой природы хозяйствующим человеком становится с каждым годом все более разрушительным как по форме, так и по содержанию. Доминирующая сегодня идеология безграничного роста потребления вместе с исключительно монетарными критериями оценки экологических последствий развития производства привела к трансформации текущего экологического кризиса в отдельных отраслях экономики в системный кризис геосфер, при котором антропосфера, созданная как среда обитания вида *Homo Sapiens*, поглощает ресурсы природных геосфер Земли значительно быстрее, чем реализуются возможности их естественного самовосстановления.

Экологический смысл этих процессов определяется особенностями эволюционного развития в составе естественной биоты Земли человека разумного как первого и единственного биологического вида, существующего вне природного баланса энергии Солнца. Именно благодаря разуму человек сформировал и занял абиотическую экологическую нишу, удовлетворяя потребности за счет частичного уничтожения естественной биоты Земли и формирования на этих территориях искусственных экосистем различного назначения, равновесных только при использовании труда человека и вещества, добытого из литосферы [1].

За истекшее столетие население Земли и площадь пашни синхронно увеличились почти в четыре раза, прирастая примерно на 3,11 % в год. За тот же период добыча вещества литосферы и производство энергии возросли в 18 раз с устойчивым приростом на 10–15 % в год [1–5]. Это означает, что интенсивный рост технократической цивилизации обеспечивается экстенсивным развитием минерально-сырьевого комплекса как материальной и энергетической основы этой цивилизации. Экологическое значение этого факта существенно возрастает ещё и потому, что до сих пор в обществе существует убеждение о том, что природу можно и надо преобразовывать и приспосабливать к интересам человека.

В целом природоёмкость промышленной и любой другой хозяйственной деятельности человека обычно не учитывается при количественных оценках этой деятельности, а экологическая опасность техногенных факторов определяется по остаточному принципу и исключительно по антропофильным критериям [5–8]. Именно поэтому сегодня постоянно ускоряющееся разрушение естественной биоты Земли происходит на фоне опережающего роста расходов технократического общества на ее сохранение, а любое увеличение потребления минерального сырья в антропосфере сопровождается избыточной техногенной нагрузкой на природу.

Попытки преодолеть эти фундаментальные противоречия монетаристическими методами в рамках экономического императива, которые регулярно предпринимаются в

решениях многочисленных экологических форумов различного масштаба, пока не дали сколько-нибудь заметных результатов. Поэтому сегодня, когда перед человечеством во весь рост встала проблема сохранения естественной биоты Земли как единственной гарантии собственного выживания, наличие показателей количественной оценки экологичности применяемых технологий (в том числе и горных) становится необходимым и обязательным условием разработки концепции экологического императива как идеологической основы перехода к устойчивому развитию недропользования на основе экологизации технологической парадигмы и перехода к конвергентным горным технологиям.

Цель исследований: научное обоснование и создание биологически значимых методов количественной оценки экологических последствий развития минерально-сырьевого комплекса.

Методические подходы

Вполне логично, что введение понятия устойчивого развития (*sustainable development*) как средства перспективного решения экологических проблем при развитии технократического общества сделало необходимым создание критериев оценки «экологической эффективности» применяемой технологической парадигмы антропосферы в целом, так и отдельных ее отраслей, соответствующих известному принципу Рёберта о консенсусе в отношении характера естественной поэтапной структуры как необходимому условию экологической устойчивости.

Из общей теории когнитивного резонанса известно, что пути и методы решения любой принципиально новой проблемы целесообразно искать в тех областях знаний, где аналогичные по смыслу и целям результаты уже получены [9]. Критериальной основой принятых подходов к проблеме является система показателей, отражающих либо степень опасности тех или иных техногенных факторов для здоровья человека, либо снижение эффективности производства [10–14]. В этом случае отсутствие методической возможности биологически адекватной экономической оценки степени техногенного поражения живой природы Земли вместе с не менее очевидной необходимостью существования такой оценки для регулирования взаимодействия биосферы и человека, обуславливают целесообразность разрешения этого противоречия на основе известного методического принципа Р. Фейнмана о «шаге в сторону» [15]. В условиях абсолютной доминанты экономического императива таким шагом могло бы стать обоснование и создание универсального, но не денежного подхода к оценке экологических последствий недропользования, как, впрочем, и любой другой промышленной деятельности.

Тогда смысловая основа методики стимулирования инновационного развития добывающих отраслей должна базироваться на двух фундаментальных положениях:

- создании и применении универсального критерия, обеспечивающего возможность как общей оценки результата, так и оценки каждой из составляющих его величин;
- применении унифицированной методики определения этого критерия для каждой конкретной производственной системы.

Результаты исследований

Планетарный масштаб развития минерально-сырьевого комплекса и геологическая заданность дислокации месторождений полезных ископаемых в литосфере сделали равновероятным появление добывающего предприятия в любой точке заселенной и незаселенной части суши нашей планеты. Одновременно эволюционно порожденный абиологический способ получения человеком вещества и энергии для биологического и инфраструктурного развития привел к фактическому формированию на поверхности суши трех типов экосистемных комплексов, принципиально различающихся как функциональной структурой биоты, так и содержанием понятия экологической безопасности техногенного воздействия.

Это означает, что при решении всех вопросов взаимодействия человека и природы необходимо учитывать фактически сложившееся деление биосферы суши на три различных типа экосистем, кардинально различающихся по целеполаганию:

- естественные экосистемы биосферы, не затронутые прямым антропогенным воздействием;
- искусственные сельскохозяйственные экосистемы, обеспечивающие пищевую базу существования человечества (так называемая вторая природа);
- искусственные экосистемы обитания человека, включающие в себя урбанизированные территории и техносферу.

В пределах каждого из этих функциональных типов экосистем устойчивое развитие обеспечивается путем использования трех операционных правил, известных как правила Дейли [17]:

Возобновляемые ресурсы биосферы должны использоваться не быстрее, чем они восстанавливаются.

Невозобновляемые ресурсы литосферы должны использоваться не быстрее, чем будут внедряться их возобновляемые аналоги.

Загрязняющие вещества и отходы должны поступать в геосферу Земли не быстрее, чем природные системы смогут их поглотить, переработать или обезвредить.

Именно такая, триединая, структура геонимической среды делает совершенно необходимым дифференцированный подход к созданию методики выбора и определения универсального экологического критерия в рамках единой концепции экологической безопасности технологий вообще, в первую очередь – горных технологий, обеспечивающих развитие минерально-сырьевого комплекса.

При освоении запасов месторождений, дислоцированных в пределах природно-равновесных экосистем естественной биоты Земли, конечной целью экологической защиты фактически является сохранение биологического разнообразия, которое может быть достигнуто через сохранение условий самовосстановления эдификаторной синусии фитоценоза

биоты в постэксплуатационный период. Любое горное производство в границах экосистем естественной биоты Земли неизбежно сопровождается полным разрушением их биоты на площади, занятой самим предприятием, и частичным поражением элементов биоты в зоне дистанционного действия техногенных факторов.

Для определения степени изменения состояния природных объектов в биологии принято использовать прямые или косвенные биоиндикаторы, а в сложных случаях – биоиндикаторные системы. Действующая классификация биоиндикаторов для единичных видов выделяет биоиндикаторы регистрирующие, а для биологических систем – аккумулятивные. Общими требованиями к используемому биоиндикатору являются: быстрая реакция, надежность, простота и мониторинговые возможности в виде постоянного присутствия в исследуемой системе [18, 19].

С учетом этих обстоятельств для типовой структуры техногенного воздействия горнодобывающих предприятий и особенностей транзита и депонирования техногенных факторов в различных типах экосистем в качестве универсального критерия для интегральной экологической оценки последствий работы горного предприятия можно предложить показатель техногенного поражения биоты B_n , отражающий, как площадь зоны техногенного поражения P_B , так и степень изменения состояния биоты на этой площади в виде величины индекса изменения I_B :

$$B_n = P_B \cdot I_B. \quad (1)$$

Обе величины определяются либо натурными изменениями по известным методикам пробных площадок и экологического профилирования с обработкой полученных данных флористическим методом Браун – Бланка [16, 20], либо по данным космического мониторинга [18, 21, 22].

В последнем случае величина индекса изменения биоты составит:

$$B_n = \pi \cdot r_n^2 \cdot \frac{K_{C_0} - K_{C_i}}{K_{C_0}}, [M^2], \quad (2)$$

где r_n – средний радиус зоны изменения коэффициента спектральной яркости от нулевого значения на границе земельного отвода, занятого поверхностным комплексом горного предприятия до эталонной K_{C_0} для данной фитоценоза;

K_{C_i} – среднее значение коэффициента спектральной яркости по площади P_B .

По внутреннему содержанию предлагаемый критерий B_n является частью косвенной аккумулирующей биоиндикаторной системы, которая может быть использована для количественной оценки экологических последствий разработки месторождений в пределах любого природно-территориального комплекса. Тогда отношение этой величины к количеству добытого в процессе освоения участка недр вещества литосферы $V_{вл}$ становится универсальным удельным биоиндикатором для экологической оценки конкретной горнотехнической системы.

В рамках гипотезы о коэволюционном взаимодействии природно-технических систем добычи минеральных ресурсов литосферы, развитой в работе [16], такой биоиндикатор можно трактовать как экологическую цену C_3 конечного продукта:

$$C_э = \frac{P_б \cdot I_б}{V_{бл}} \quad (3)$$

Учитывая типичную для горной промышленности стадийность отработки запасов месторождений твердых полезных ископаемых, экологическая цена всегда имеет статическую $C_{эс}$ и динамическую $C_{эд}$ составляющие, отражающие, соответственно, экологическую нагрузку на биоту на стадии вскрытия и отработки запасов месторождения:

$$C_{эс} = \frac{P'_б \cdot I'_б}{V_{бз}}, \quad (4)$$

где $P'_б$ – общая площадь отторжения земель биоты под создание поверхностного комплекса предприятия, м²;

$I'_б$ – индекс поражения биоты, ед.;

$V_{бз}$ – балансовые запасы месторождения, т.

Динамическая составляющая текущей экологической цены $C_{эд}$ определяется как отношение ежегодного прироста площади $P_{бг}$ и степени $I_{бг}$ техногенного поражения естественной биоты к годовой величине погашения балансовых запасов $A_{гб}$:

$$C_{эд} = \frac{P_{бг} \cdot I_{бг}}{A_{гб}} \quad (5)$$

Итоговая экологическая цена определится как сумма

$$C_э = C_{эс} + C_{эд} \left[\frac{м^2}{т} \right]. \quad (6)$$

Экологическая цена продукции горного предприятия, расположенного на площади, занятой сельскохозяйственными угодьями $C_{сх}$, определяется по форме, идентичной с естественной биотой, но имеет совершенно иное содержание используемых показателей.

Известно, что для систем «второй природы» содержание понятия экологической безопасности строится на регламентации уровня техногенных воздействий по показателям плодородия почвы как средства производства [23]. Поэтому в качестве универсального критерия при интегральной оценке техногенного воздействия предприятия сельскохозяйственного назначения («вторая природа») базируется на учете снижения хозяйственной ценности нарушаемой искусственной экосистемы, которая, в свою очередь, оценивается по величине балла плодородия $V_п$.

В практике используется несколько методов определения этого показателя, но наиболее распространенным является методика ЦИНАО [24–26].

Для данного типа экосистем величина универсального критерия $V_{сх}$ для экологической оценки их нарушения в процессе разработки месторождения отражает площадь сельскохозяйственных угодий $S_п$, на которой полностью или частично утрачено плодородие почв:

$$V_{сх} = \Delta V_п \cdot S_п, \quad (7)$$

где $\Delta V_п$ – диапазон изменения величины балла плодородия.

В такой постановке экологическая цена $C_{сх}$ единицы продукции горного предприятия, расположенного на сельскохозяйственных землях, определяется из выражения

$$C_{сх} = \frac{S_{пк} \cdot V_{п0}}{V_{бз}} + \frac{P_б \cdot (V_{п0} - V_{пi})}{A_{гб}}, \frac{ед.}{т}, \quad (8)$$

где $S_{пк}$ – площадь промплощадки рудника, м²;

$V_{п0}$ – исходная величина критерия плодородия;

$V_{пi}$ – фактическая величина критерия плодородия.

Взаимодействие добывающих предприятий с урбанизированной составляющей площади антропосферы не является типичным явлением при развитии минерально-сырьевого комплекса. Тем не менее такая вероятность существует как неизбежное следствие геологической предопределенности дислокации месторождений в земной коре.

Тогда, согласно работе [27], исходные данные для расчета экологической цены добытого сырья получают при проведении аудита площади поселения методом кругов устойчивости.

Заключение

1. Современная антропосфера как искусственная экологическая ниша, занимаемая человеком, функционирует в режиме интенсивного поглощения экосистем биосферы Земли с последующим созданием на этом месте сельскохозяйственных, селитебных и техносферных систем, экологическое равновесие в которых поддерживается за счет труда человека. Такое развитие антропосферы обеспечивается экстенсивным по своей организационной форме ростом объемов добычи различных видов минерального сырья из литосферы.

2. Выраженное несоответствие реальных целей природоохранной деятельности и критериев, применяемых для оценки ее результатов в сочетании с биосистемным антагонизмом человека и природы, привели к тому, что возрастающее разрушение биосферы Земли происходит на фоне более быстрого роста затрат общества на ее сохранение. В условиях рыночной экономики любые изменения применяемых технологий в интересах экологической безопасности неизбежно повышают издержки производства со всеми вытекающими отсюда последствиями.

3. Создан и предложен в виде показателя экологической цены конечного продукта немонетизированный критерий оценки интенсивности техногенного поражения биоты в процессе функционирования минерально-сырьевого комплекса техносферы. Использование этого показателя в сырьевых отраслях промышленности не только позволит ранжировать применяемые технологии по степени их экологической эффективности, но и дать побудительный стимул к поиску новых возможностей развития в направлении минимизации природоемкости добывающих отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Галченко Ю.П. Человек как «геологическая сила» и перспективы геонимии. *Наука и общество в XX–XXI вв.: сборник научных трудов: Часть первая*. Москва, 2024: 210–237.
Galchenko Yu.P. Man as a «geological force» and the prospects of geonomy. *Science and Society in the XX–XXI centuries: Part one, Moscow*, 2024: 210–237. (In Russ.).
2. World Resources Record 2022 / World Resourced Institute. URL: <https://tools-wri.org/publication>.
3. Hodge R.A., Ericsson M., Lof O., et al. The global mining industry: corporate profile, complexity, and change. *Mineral Economics*. 2022; 35 (3–4): 587–606. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00343-1>.
4. World Energy Outlook 2024. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
5. Михайлов В.Г. Обзор современных направлений обеспечения экологической безопасности. *Journal of Mining and Geotechnical engineering*. 2023; 1 (23): 71–91. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-1-71-97>.
Mikhailov V.G. Review of modern trends in environmental safety. *Journal of Mining and Geotechnical engineering*. 2023; 1 (23): 71–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-1-71-97>.
6. XXXII Моисеевские чтения: научно-практическая конференция «Система «УЧИТЕЛЬ» академика Н.Н. Моисеева и современная историческая обстановка: Философские, эколого-политологические и педагогические основания для научного анализа». Москва, 2025. URL: <https://mnepu-ras.ru>
XXXII Moiseev Readings – scientific and practical conference «The TEACHER system – Academician N.N. Moiseev and the modern historical situation: Philosophical, ecological, political and pedagogical foundations for scientific analysis». Moscow, 2025. (In Russ.). URL: <https://mnepu-ras.ru>
7. Туртыгина Н.А., Охрименко А.В., Фролов Н.А. Классификация способов стабилизации качества рудопотока при подземной добыче. *Рациональное освоение недр*. 2023; 4: 32–40. <https://doi.org/10.26121/RON.2023.51.61.002>.
Turtygina N.A., Okhrimenko A.V., Frolov N.A. Classification of methods for stabilizing the quality of ore flow during underground mining. *Rational development of the subsoil*. 2023; 4: 32–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.26121/RON.2023.51.61.002>.
8. United Nations «Global Sustainable Development Report (GSDR) 2023». United Nations Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/gsdrgsd2023>.
9. Хмылёв В.Л., Кондрасюк В.А. Коммуникативные стандарты интенсивности когнитивного резонанса. *Вестник Томского государственного университета*. 2015; 390: 66–72.
Khmylev V.L., Kondrasyuk V.A. Communicative standards of cognitive resonance intensity. *Bulletin of Tomsk State University*. 2015; 390: 66–72. (In Russ.).
10. Кричевский С.В. Экологическая история техники от технологий до техносферы. XX – начало XXI века. Методология, опыт, перспективы: монография. Москва, 2023: 367.
Krichevsky S.V. The ecological history of technology from technology to the technosphere. XX – the beginning of the XXI century. Methodology, experience, prospects: a monograph. Moscow, 2023: 367. (In Russ.).
11. Weiss M., Coelho V.N. Open pit mining operational planning using Multi Agent Systems. *Procedia Computer Science*. 2021; 192: 1677–1686. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.172>.
12. Джевага Н.В., Чухланцева Т.П. Промышленные отходы в горнодобывающей отрасли: современное состояние и пути решения проблем. *Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: III Всероссийская научная конференция с международным участием*. Красноярск, 2022: 210–216.
Dzhevaga N.V., Chukhlantseva T.P. Industrial waste in the mining industry: current state and ways to solve problems. *III All-Russian scientific conference with international participation «Science, Technology, Society: environmental engineering in the interests of sustainable development of territories»*. Krasnoyarsk, 2022: 210–216. (In Russ.).
13. Волкова Н.П., Волкова А.А. Особенности реализации концепции устойчивого развития: проблемы и перспективы. *Вестник Московского университета*. Серия 12: Политические науки. 2023; 3: 32–48.
Volkova N.P., Volkova A.A. Features of the implementation of the concept of sustainable development: problems and prospects. *Bulletin of the Moscow University. Ser. 12. Political sciences*. 2023; 3: 32–48. (In Russ.).
14. Wang Z., Wang G., Ran T., et al. Assessment of soil fertility degradation affected by mining disturbance and land use in a coalfield via machine learning. *Ecological Indicators*. 2021; 125: 107608. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIN.2021.107608>.
15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Москва, 1965: 110.
Feynman R., Leighton R., Sands M. Feynman lectures on Physics. Moscow, 1965: 110. (In Russ.).
16. Трубетцкой К.Н., Галченко Ю.П., Озарян Ю.А. Экологическая цена минерального сырья как потенциальный регулятор технологической парадигмы недропользования при устойчивом развитии. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021; 2: 396–409.
Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P., Ozaryan Yu.A. Ecological price of mineral raw materials as a potential regulator of the technological paradigm of subsurface use with sustainable development. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 2: 396–409. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-2-1-396-409>.
17. Пинтер Л., Харди П., Бартельмус П. Показатели устойчивого развития: предложения по дальнейшему развитию. 2005. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.1e6d4a20-690b0734-8507d283-74722d776562/https://www.iisd.org/system/files/publications/measure_indicators_sd_way_forw ard.pdf.
Pinter L., Hardy P., Barthelmus P. Indicators of sustainable development: proposals for further development. 2005. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.1e6d4a20-690b0734-8507d283-74722d776562/https://web.archive.org/web/20240708130031/https://www.iisd.org/system/files/publications/measure_indicators_sd_way_forward.pdf. (In Russ.).
18. Шуберт Р. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем. Москва, 2010: 320.
Schubert R. Bioindication of pollution of terrestrial ecosystems. Moscow, 2010: 320. (In Russ.).
19. Afum B.O., Ben-Awuah E.A. Review of models and algorithms for surface-underground mining potions and transitions optimization: Some lessons learn and the way forward. *Mining*. 2021; 1: 112–134.
20. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. Wien; New-York, 1964: 135.
21. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Geoprgiadi A.G., et al. Environmental and Economic Indicators of Antronogenic Impacts on Water Resources in Russia and the World. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020; 90 (4) :428–436. <https://doi.org/10.1134/S1019331620040103>.

22. Жарко В.О., Бартелев С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014; 11 (3): 159-170.
Zharko V.O., Bartelev S.A. Assessment of the recognizability of forest tree species based on satellite data on seasonal changes in their spectral and reflective characteristics. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2014; 11 (3): 159-170. (In Russ.).
23. Галченко Ю.П., Ерёмченко В.А. Природно-технические системы подземной разработки рудных месторождений на основе конвергентных горных технологий. Москва, 2023: 288.
Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Natural and technical systems of underground mining of ore deposits based on convergent mining technologies. Moscow, 2023: 288. (In Russ.).
24. Ганжара Н.Ф. Почвоведение. Москва, 2001: 392.
Ganzhara N.F. Soil Science. Moscow, 2001: 392. (In Russ.).
25. Ващенко Т.А., Миронычев К.А., Коничев В.С. Основы почвоведения, земледелия и агрохимии. Москва, 2013: 176.
Vashchenko T.A., Mironychev K.A., Konichev V.S. Fundamentals of soil science, agriculture and agrochemistry. Moscow, 2013: 176. (In Russ.).
26. Вальков В.Ф., Денисов Т.В., Казеев К.Ш. и др. Плодородие почв: экологические, социальные и почвенно-генетические особенности. Ростов-на-Дону, 2013: 301.
Valkov V.F., Denisov T.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Soil fertility: ecological, social, and soil-genetic features. Rostov-on-Don, 2013:301. (In Russ.).
27. James Paul, Andy Skerry. Auditing cities with the help of Sustainability Circles. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.1e6d4a20-69b0734-8507d283-74722d776563/https://www.researchgate.net/publication/287263249.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Юрий Павлович Галченко –
д-р технических наук, профессор, главный
научный сотрудник отдела горной экологии
Института проблем комплексного освоения
недр имени академика Н. В. Мельникова
Российской академии наук, г. Москва,
Российская Федерация

Yury P. Galchenko –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of
the Department of Mountain Ecology, Institute of
Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian
Federation



Екатерина Дмитриевна Якушева –
ведущий инженер лаборатории геотехнологии
комплексного освоения месторождений
полезных ископаемых Института проблем
комплексного освоения недр имени академика
Н. В. Мельникова Российской академии наук, г.
Москва, Российская Федерация

Ekaterina D. Yakusheva –
Leading Engineer of the laboratory of
geotechnology of complex development of mineral
deposits, Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of the Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russian Federation

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Contribution:

The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.02.2026

Поступила после рецензирования: 05.03.2026

Принята к публикации: 20.04.2026

Article info

Received: 06.02.2026

Revised: 05.03.2026

Accepted: 20.04.2026

Геоэкологический анализ устойчивости экосистемы Северо-Кавказского региона к техногенному и климатическому воздействию

А. И. Лазовский✉

ФГБОУ ДПО «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов»,
г. Балашиха, Российская Федерация
✉ lazovskiy.tolik@mail.ru

Резюме. Проведен комплексный анализ устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенному и климатическому воздействию. Показано, что ведущими источниками деградации природных комплексов выступают горнодобывающая промышленность, интенсивное сельское хозяйство и урбанизация. На основе анализа ГИС-моделей и спутниковых данных установлено, что на значительной части территории региона наблюдается низкий уровень устойчивости экосистем, особенно в горных и предгорных районах, где нарушены природные связи между компонентами ландшафта. Для повышения экологической устойчивости предложены меры по внедрению экологически безопасных технологий в промышленности, развитию систем геоэкологического мониторинга и рекультивации нарушенных земель. Реализация комплексного подхода к управлению природопользованием позволит стабилизировать состояние экосистем, снизить техногенное и климатическое воздействие и обеспечить устойчивое развитие Северного Кавказа.

Ключевые слова: Северный Кавказ, рациональное природопользование, устойчивость экосистем, геоэкология, техногенное и климатическое воздействие, деградация ландшафтов, геоинформационный мониторинг, рекультивация

Для цитирования: Лазовский А.И. Геоэкологический анализ устойчивости экосистемы Северо-Кавказского региона к техногенному и климатическому воздействию. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 65-69. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-65-69>.

Geoecological analysis of the resilience of ecosystems in the North Caucasus region to technogenic load

A. I. Lazovsky✉

Federal State Budgetary Educational Institution of Continuing Professional Education
“Institute for Advanced Training of Managers and Specialists”, Balashikha, Russian Federation
✉ lazovskiy.tolik@mail.ru

Abstract. The article presents a comprehensive assessment of the resilience of ecosystems in the North Caucasus region to technogenic load. The research combines remote sensing data, GIS modeling, and statistical analysis of long-term environmental monitoring reports by Roshydromet and Rosprirodnadzor for 2018–2024. The study examines the natural, geochemical, and climatic characteristics of the region that determine its ecological vulnerability. The results show that mining, intensive agriculture, and urbanization are the main drivers of environmental degradation, leading to soil erosion, contamination of surface and groundwater, loss of biodiversity, and alteration of the hydrological regime of mountain rivers. GIS and remote sensing analysis revealed that large parts of the region demonstrate low or very low ecosystem resilience, particularly in mountainous and foothill areas where the natural structure of landscapes has been disrupted. To enhance ecological stability, the study proposes the adoption of environmentally safe technologies in the mining and industrial sectors, the development of geoecological monitoring systems, and the implementation of land reclamation programs. The integration of engineering, technological, and social-ecological measures is considered a key condition for achieving sustainable development and preserving the natural potential of the North Caucasus in the context of growing anthropogenic and climatic pressures.

Keywords: North Caucasus, sustainable natural resource management, ecosystem resilience, geoecology, technogenic load, landscape degradation, GIS monitoring, reclamation

For citation: Lazovsky A.I. Geoecological analysis of the resilience of ecosystems in the North Caucasus region to technogenic load. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 65-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-65-69>.

Введение

Северо-Кавказский регион характеризуется выраженным природным контрастом, обусловленным сочетанием высокогорных, предгорных и равнинных ландшафтов. Его природные особенности определяются геополитическим положением между Каспийским и Черным морями, высокой тектонической активностью и значительной биологической продуктивностью. Эти факторы предполагают повышенную экологическую чувствительность региона, где антропогенная деятельность оказывает оперативное воздействие на устойчивость экосистем.

Интенсивное хозяйственное освоение, включающее рост промышленного производства, расширение сельскохозяйственных площадей, урбанизацию и развитие транспортной инфраструктуры приводит к нарастающей техногенной нагрузке. Последняя проявляется в деградации почвенно-растительного покрова, загрязнении гидросферы, изменении микроклиматических условий и снижении биоразнообразия. Современные тенденции глобальных климатических изменений усугубляют нестабильность природных систем. Повышение температуры воздуха, изменение режима осадков, ускорение гляциальных процессов, активизация эрозионных и дефляционных процессов почв создают предпосылки для ухудшения геоэкологического состояния региона.

Геоэкологический анализ устойчивости экосистем является инструментом оценки способности природных комплексов к сохранению своей структуры и функций при воздействии антропогенных и климатических факторов. Результаты данного анализа являются основой для разработки программ рационального природопользования и мероприятий по предупреждению деградации природной среды [1].

Цель исследований: геоэкологический анализ устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенному и климатическому воздействию.

Материал и методы исследования

Исследование выполнено на основе комплексного анализа данных дистанционного зондирования Земли, геоинформационного моделирования, картографических и полевых наблюдений, а также обобщения опубликованных материалов и статистических отчетов природоохранных ведомств.

Использовались спутниковые снимки Landsat и Sentinel, данные Росгидромета о состоянии атмосферы и гидросферы, отчеты Росприроднадзора и территориальных органов природопользования за 2018–2024 года.

Для оценки степени антропогенной нагрузки применялась методика картографирования зон экологического риска, основанная на интеграции показателей загрязнения почв, атмосферного воздуха и поверхностных вод. Анализ геохимических характеристик почвенного покрова осуществлялся с использованием данных о концентрациях 25 химических элементов, в том числе свинца, меди, цинка, никеля и марганца [2].

Геоинформационные модели строились в среде ArcGIS и QGIS, что позволило визуализировать пространственное распределение техногенных аномалий и оценить устойчивость ландшафтов к воздействию человека. Дополнительно использовались климатические ряды наблюдений за последние 50 лет, предоставленные Федеральной службой по гидрометеорологии, для оценки тенденций изменения температуры воздуха, осадков и площади оледенения. При анализе дегра-

дации почвенно-растительного покрова применялись индексы NDVI и NDSI, рассчитанные на основе данных дистанционного зондирования.

Методологическая основа исследования опиралась на принципы системного и ландшафтно-экологического анализа, предусматривающие рассмотрение экосистем как динамических природно-антропогенных систем с различной степенью адаптивного потенциала. Для количественной оценки устойчивости применялся коэффициент экологической нагрузки, отражающий соотношение площади нарушенных территорий к общей площади исследуемого ландшафта.

Результаты исследования

Геоэкологические особенности региона

Северный Кавказ является территорией с высокой природной мозаичностью. Здесь сосредоточены горные хребты с крутыми склонами, предгорные равнины и долины рек. Эти особенности определяют неравномерное распределение природных процессов и различную степень устойчивости экосистем. Наиболее уязвимыми являются горные районы, где разрушение почвенно-растительного покрова вызывает развитие оползней, лавин, эрозии и других опасных процессов.

Исследования показывают, что даже при слабом антропогенном воздействии наблюдается активизация техногенно-геологических явлений, особенно в районах открытой добычи полезных ископаемых и строительных разработок [3]. Геохимическая структура региона отличается высоким содержанием природных металлов и минеральных соединений, что при неуправляемом техногенном воздействии усиливает загрязнение почв и вод.

Анализ пространственного распределения геохимических аномалий показал, что в почвах бассейнов рек Сулак, Уллучай и Сунжа концентрации натрия и тяжелых металлов превышают фоновые значения в десятки раз, достигая 300 г/кг для отдельных элементов [2]. Накопление свинца, цинка, меди и никеля свидетельствует о длительном воздействии промышленных выбросов и миграции загрязняющих веществ с поверхности хвостохранилищ.

Климат региона оказывает решающее влияние на устойчивость экосистем. В последние полвека среднегодовая температура в горах Кавказа увеличилась более чем на один градус. Это вызвало сокращение площади ледников на 10 % и изменение гидрологического режима рек [4]. Изменения климата сопровождалось увеличением частоты селевых потоков, усилением паводковой активности и ростом оползневой опасности.

Эти процессы нарушают природный баланс, усугубляя последствия техногенной деятельности.

Техногенная нагрузка и деградация природных комплексов

На устойчивость экосистем Северного Кавказа наибольшее воздействие оказывает горнодобывающая промышленность. На территориях Северной Осетии – Алании, Карачаево-Черкесии и Кабардино-Балкарии функционируют крупные рудники и хвостохранилища, где добыча и переработка руд сопровождаются накоплением отходов, пылевыми выбросами и загрязнением подземных вод [5]. Даже после прекращения работы предприятий продолжается поступление загрязняющих веществ в почвенно-гидрологические системы, что подтверждается данными многолетних наблюдений.

Промышленные предприятия региона способствуют загрязнению атмосферы. В городах Владикавказ, Нальчик и Махачкала наблюдаются превышения предельно допустимых концентраций тяжелых металлов в воздухе, а более трети промышленных объектов не оснащены современными фильтрационными системами [7]. Загрязнение воздуха сопровождается выпадением осадков, содержащих сульфаты, нитраты и соединения свинца, которые оседают на почвы и водные объекты, формируя устойчивый техногенный фон.

Сельское хозяйство является вторым по значимости источником антропогенной нагрузки. Интенсивное использование земель, применение минеральных удобрений и мелиорация без учета ландшафтных особенностей приводят к эрозии, деградации и засолению почв. В предгорных районах Дагестана и Чеченской Республики площадь эродированных земель увеличилась на 17 % за последние два десятилетия [6]. Нарушение водного баланса и неправильное орошение способствуют повышению минерализации грунтовых вод и снижению плодородия.

Урбанизация и развитие рекреационной инфраструктуры усиливают антропогенное воздействие на природные системы. В туристических зонах Архыза, Домбая и Приэльбрусья растет плотность застройки, нарушается дренажная сеть, происходит уплотнение почв и разрушение травяного покрова. В результате ухудшается качество водных ресурсов, сокращается площадь естественных экосистем, снижается ландшафтное разнообразие [8]. Совокупность этих факторов формирует системный экологический кризис, который затрагивает все компоненты природной среды.

Оценка устойчивости экосистем

Оценка устойчивости природных комплексов проводится на основе совокупности критериев, включающих биологическую продуктивность, способность к саморегуляции, уровень биоразнообразия и степень антропогенного воздействия. Современные методы геоинформационного анализа позволяют выделять зоны с различной степенью устойчивости, используя данные спутникового мониторинга, дистанционного зондирования и наземных наблюдений [9, 10].

Исследования показали, что значительная часть экосистем Северного Кавказа характеризуется низкой устойчивостью. В Северной Осетии – Алании на основе анализа пространственных баз данных выделены участки с катастрофическим и кризисным экологическим состоянием, где отмечено сочетание повышенного уровня загрязнения тяжелыми металлами, шума и радиационного фона [5]. В почвах Владикавказского промышленного района содержание цинка превышает фоновые значения в семь раз, меди – в три раза, а свинца – в пять раз.

Ежегодные потери почвенного слоя в горных районах Карачаево-Черкесии достигают 40 т/га, что значительно превышает естественные темпы восстановления [6]. Постепенное снижение биоразнообразия является одним из ключевых признаков ослабления устойчивости. На деградированных территориях сокращается численность эндемичных и редких видов растений и животных, нарушаются трофические связи и экосистемные функции. В последние годы на склонах Кавказского хребта наблюдается распространение растений-фитоксикаторов, способных накапливать тяжелые металлы, что свидетельствует о биологической адаптации экосистем к техногенному загрязнению [11]. Однако эти процессы но-

сят временный характер и не компенсируют общее снижение природной устойчивости региона.

Направления повышения экологической устойчивости

Восстановление устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона требует комплексного подхода, включающего инженерно-технические, природоохранные и социально-экономические меры. Наиболее перспективным направлением является внедрение экологически безопасных технологий в горнодобывающей отрасли, в частности использование замкнутых циклов водоснабжения, переработка хвостов и утилизация отходов без их накопления на поверхности [12]. Применение биотехнических методов рекультивации, включая фитоэкстракцию тяжелых металлов с помощью растений семейства крестоцветных, показало положительные результаты при восстановлении загрязненных земель [11].

Геоинформационные технологии играют ключевую роль в управлении природными ресурсами и мониторинге состояния экосистем. Использование спутниковых данных и моделей пространственного анализа позволяет выявлять участки деградации, отслеживать динамику антропогенной нагрузки и оценивать эффективность природоохранных мероприятий [9].

Важным направлением является развитие сети особо охраняемых природных территорий, которые должны стать ядрами устойчивости и зонами экологического каркаса региона. Расширение охраняемых зон способствует сохранению биоразнообразия, предотвращает деградацию почв и стабилизирует климатические условия [10].

Не менее значимым фактором является повышение экологической культуры населения и включение местных сообществ в процессы природоохранного управления. Развитие экологического образования, просвещение и участие граждан в мониторинге состояния окружающей среды способствуют формированию ответственного отношения к природным ресурсам. Опыт показывает, что включение населения в программы по восстановлению экосистем значительно повышает их эффективность [11].

Обсуждение

1. Полученные данные свидетельствуют о том, что экосистемы Северо-Кавказского региона испытывают высокую техногенную нагрузку. Основные источники загрязнения связаны с деятельностью горнодобывающих предприятий, транспортной инфраструктурой, сельскохозяйственным производством и урбанизацией.

На территории Северной Осетии – Алании выявлены зоны критического экологического состояния, где концентрации тяжелых металлов в почвах превышают фоновые значения в пять-семь раз, а содержание цинка достигает 400 мг/кг [5]. В результате антропогенного воздействия происходят процессы эрозии и деградации почв.

В горных районах Карачаево-Черкесии ежегодные потери почвенного слоя составляют 30–40 т/га, что значительно превышает естественные темпы восстановления [6]. Атмосферный воздух крупных городов региона характеризуется повышенным содержанием диоксида серы, оксидов азота и пылевых частиц. В районах с высокой транспортной активностью отмечается превышение предельно допустимых концентраций свинца и кадмия [7]. Мониторинг Росприроднадзора показал, что более 35 % промышленных предприятий

Северного Кавказа не оснащены современными системами фильтрации выбросов.

2. На предгорных территориях наблюдается увеличение площади засоленных и переувлажненных земель, а в долинах рек фиксируется загрязнение донных отложений нефтепродуктами и тяжелыми металлами. Геохимический анализ почв бассейнов рек Сулак, Уллучай и Сунжа подтвердил наличие пространственных аномалий содержания тяжелых металлов. Концентрации натрия и марганца в отдельных пробах превышали природный фон в десятки раз, что указывает на интенсивную миграцию загрязняющих веществ по водосборным системам [2]. Эти процессы приводят к вторичному загрязнению водных экосистем и снижению их самоочищающей способности.

3. Особую роль в формировании экологического состояния региона играет изменение климата. За последние 50 лет среднегодовая температура в горных районах увеличилась на 1,4 °C, что вызвало сокращение площади ледников более чем на 10 % [4]. Это сопровождается усилением паводков, изменением гидрологического режима рек и ростом оползневой активности. В сочетании с антропогенным воздействием климатические изменения ускоряют деградацию природных комплексов.

4. Использование данных дистанционного зондирования позволило выделить территории с различной степенью устойчивости экосистем. На равнинных участках предкавказских степей и полупустынь устойчивость оценивается как средняя благодаря высокой биопродуктивности и способности к восстановлению растительного покрова. В горных и предгорных районах наблюдается низкая и крайне низкая устойчивость, что связано с нарушением почвенного слоя, изменением гидрологического баланса и снижением биоразнообразия.

5. Для повышения экологической устойчивости региона необходим комплекс мер. В промышленности следует внедрять технологии замкнутого водоснабжения и безопасного хранения отходов [12]. В сельском хозяйстве требуется переход к адаптивно-ландшафтным системам земледелия, предотвращающим эрозию и засоление почв. Эффективным инструментом управления становится развитие систем экологического мониторинга на основе ГИС и дистанционного зондирования [9], [10]. Важную роль играет создание сети особо охраняемых природных территорий, выполняющих функции экологического каркаса, а также повышение уровня экологической культуры населения [11].

6. Результаты исследования показывают, что экосистемы Северо-Кавказского региона находятся под значительным техногенным и климатическим воздействием, что приводит к снижению их устойчивости и потере способности к саморегуляции. Наиболее уязвимыми оказались горные и предгорные ландшафты, где антропогенные нагрузки и природные процессы действуют синергетически, усиливая деградационные изменения. Геоэкологический анализ подтвердил наличие пространственной дифференциации устойчивости экосистем и выявил зоны с критическим уровнем загрязнения почв, вод и атмосферы.

7. Для обеспечения устойчивого развития региона необходимо формирование системы адаптивного управления природопользованием, включающей интеграцию геоинформационных технологий, развитие мониторинга, рекультивацию

нарушенных территорий, совершенствование законодательной базы и экологическое образование населения. Реализация данных мер позволит повысить устойчивость природных систем, снизить техногенное воздействие и сохранить природный потенциал Северного Кавказа для будущих поколений.

Заключение

1. Результаты проведенного исследования показывают, что экосистемы Северо-Кавказского региона обладают высокой природной ценностью, но крайне низкой устойчивостью к современным техногенным нагрузкам [13, 14]. Многолетняя деятельность горнодобывающих предприятий, сельское хозяйство, урбанизация и изменение климата привели к комплексной трансформации природных систем.

2. Геоэкологический анализ выявил, что деградационные процессы имеют устойчивый характер и затрагивают все компоненты экосферы, включая почвы, воды, атмосферу и биоту. Для сохранения природного потенциала региона необходимо формирование системы адаптивного управления, основанной на данных геомониторинга и принципах рационального природопользования [15].

3. Совмещение инженерных решений, природоохранных мер и образовательных программ позволит повысить устойчивость экосистем, восстановить нарушенные ландшафты и обеспечить экологическую безопасность населения. Северный Кавказ является примером региона, где гармонизация природных и экономических интересов становится ключевым условием устойчивого развития России в целом.

Выводы

1. В статье приведены результаты геоэкологического анализа устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона, показавшие, что природные комплексы территории характеризуются высокой мозаичностью и неоднородной устойчивостью, обусловленной сочетанием горных, предгорных и равнинных ландшафтов, а также интенсивным антропогенным воздействием и климатическими изменениями. Установлено, что наиболее уязвимыми являются горные и предгорные экосистемы, где процессы эрозии, оползней, загрязнения почв и водных объектов, а также сокращение ледников приводят к снижению их способности к саморегуляции и устойчивому функционированию. Выявлена пространственная дифференциация уровней экологической нагрузки и наличие зон с критическим и кризисным состоянием природной среды, особенно в районах промышленной и хозяйственной активности.

2. Результаты исследования могут быть полезными при разработке программ рационального природопользования, стратегий устойчивого развития регионов Северного Кавказа, а также при планировании природоохранных мероприятий, рекультивации нарушенных территорий и организации системы экологического мониторинга.

3. Полученные данные могут использоваться органами государственного управления, природоохранными структурами и научными организациями для оценки экологических рисков, обоснования управленческих решений и совершенствования механизмов регулирования хозяйственной деятельности с учетом природно-климатических особенностей региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арутюнов В.В. Геоэкология и природопользование. Москва, 2020: 368.
Arutjunov V.V. Geocology and nature management. Moscow, 2020: 368. (In Russ.).
2. Kashirina E., Gorbunov R., Kerimov I. Spatial Distribution of Geochemical Anomalies in Soils of River Basins of the Northeastern Caucasus. *Geosciences*. 2025; 15 (10): 380. <https://doi.org/10.3390/geosciences15100380>.
3. Мальнева И.В. Техногенное воздействие на развитие опасных геологических процессов на территории Северного Кавказа. *Геология и геофизика*. 2021; 4: 17-25.
Mal'neva I.V. Man-made Impacts on the Development of Hazardous Geological Processes in the North Caucasus. *Geology and Geophysics*. 2021; 4: 17-25. (In Russ.).
4. Юзбеков М.А., Юзбеков А.К. Развитие системы управления в области охраны окружающей среды. *Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление*. 2023; 2 (45): 40-48.
Yuzbekov M.A., Yuzbekov A.K. Development of a management system in the field of environmental protection. *Bulletin of Moscow University named after S. Yu. Witte. Series 1: Economics and Management*. 2023; 2 (45): 40-48. (In Russ.).
5. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Geocological Factors in Assessing the State of the Geological Environment Based on the Analysis of Spatial Databases of the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Applied Sciences*. 2022; 12 (5): 2644. <https://doi.org/10.3390/app12052644>.
6. Горбунов Р.С., Керимов И.М. Состояние почвенного покрова Предкавказья в условиях техногенного воздействия. *Вестник Дагестанского ГУ*. 2022; 2: 34-42.
Gorbunov R.S., Kerimov I.M. The state of the soil cover of the Ciscaucasia under anthropogenic impact. *Bulletin of the Dagestan State University*. 2022; 2: 34-42. (In Russ.).
7. Ахметшина Л.Г. Эколого-экономическая оценка федеральных округов Российской Федерации и варианты финансирования природоохранных мероприятий. *Проблемы региональной экологии*. 2024; 5: 79-84.
Akhmetshina L.G. Environmental and economic assessment of federal districts of the Russian Federation and options for funding environmental protection measures. *Regional environmental issues*. 2024; 5: 79-84. (In Russ.).
8. Атаев З.В. Селитебная нагрузка на ландшафты Северного Кавказа. *География и геоэкология*. 2012; 3: 51-57.
Ataev Z.V. Settlement pressure on the landscapes of the North Caucasus. *Geography and geoecology*. 2012; 3: 51-57. (In Russ.).
9. Мельников А.А. Методы геоэкологического мониторинга и моделирования. Санкт-Петербург, 2022: 301.
Mel'nikov A.A. Methods of geoecological monitoring and modeling. Saint Petersburg, 2022: 301. (In Russ.).
10. Касимов Н.С., Тикунев В.С. Геоинформационные технологии в экологии и природопользовании. Москва, 2020: 228.
Kasimov N.S., Tikunov V.S. Geoinformation technologies in ecology and nature management. Moscow, 2020: 228.
11. Дзаганя Л.М. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений в субтропической зоне Кавказа: обзор литературы. *Южно-Российский журнал географии*. 2023; 2: 66-72.
Dzaganija L.M. Geocological hazards under climate change in the subtropical zone of the Caucasus: a literature review. *South-Russian Journal of Geography*. 2023; 2: 66-72. (In Russ.).
12. Иванов Н.В. Экологически безопасные технологии переработки минерального сырья. *Горный журнал*. 2021; 6: 73-80.
Ivanov N.V. Environmentally friendly technologies for processing mineral raw materials. *Mining Journal*. 2021; 6: 73-80. (In Russ.).
13. Герасимов И.П. Природная среда и хозяйство Северного Кавказа. Ростов-на-Дону, 2018: 289.
Gerasimov I.P. Natural environment and economy of the North Caucasus. Rostov-on-Don, 2018: 289. (In Russ.).
14. Buzmakov S.A., Panyushkina I.P., Ivanenko A.V. Climate and Environmental Changes in the Caucasus Region under Anthropogenic Pressure. *Environmental Research Letters*. 2023; 18 (4): 145-160.
15. Воробьев Ю.Л., Ткаченко Е.А. Геоэкологические основы устойчивого развития регионов России. Москва, 2019: 412.
Vorob'ev Ju.L., Tkachenko Je.A. Geocological foundations of sustainable development of Russian regions Moscow, 2019: 412. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Анатолий Иванович Лазовский –
докторант Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения дополнительного
профессионального образования «Институт повышения
квалификации руководящих работников и специалистов, г.
Балашиха, Российская Федерация; e-mail: lazovskiy.tolik@
mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.02.2026
Поступила после рецензирования: 17.03.2026
Принята к публикации: 24.04.2026

ABOUT THE AUTHOR

Anatoly I. Lazovsky – Doctoral Student Federal State
Budgetary Educational Institution of Continuing Professional
Education “Institute for Advanced Training of Managers and
Specialists”, Balashikha, Russian Federation; e-mail: lazovskiy.
tolik@mail.ru

Article info

Received: 10.02.2026
Revised: 17.03.2026
Accepted: 24.04.2026

Журнал включен в перечень ВАК по специальностям:

- 1.6.21. Геоэкология (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки),
- 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки)
- 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки),
- 2.8.8. Геотехнология, горные машины (технические науки),
- 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых (технические науки).

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!

0+

12+

0+

Mining Week
KAZAKHSTAN, 2026

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР



23-25
06/2026

КАРАГАНДА, КАЗАХСТАН

TNT EXPO
TOO «TNT EXPO»

tel:
+7 (727) 344 00 63

e-mail:
mintek@tntexpo.kz

inst:
mining-week.kazakhstan

