

0+

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

# МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 26, № 3, МАЙ – ИЮНЬ 2026 г.

Vol. 26, № 3, MAY – JUNE 2026

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

ОБОГАЩЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINERALS PROCESSING AND BENEFICIATION

ГЕОТЕХНОЛОГИИ  
ГОРНЫХ МАШИНЫ  
GEOTECHNOLOGY,  
MINING MACHINES  
ОБОРУДОВАНИЕ

[www.n-gn.ru](http://www.n-gn.ru)

ГЕОМЕХАНИКА  
РАЗРУШЕНИЕ  
ГОРНЫХ ПОРОД

ГЕОМЕХАНИКА  
РАЗРУШЕНИЕ  
ГОРНЫХ ПОРОД

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОВАЯ ДИНАМИКА  
ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

MINE AEROGAS DYNAMICS MINING THERMOPHYSICS



5-й юбилейный международный конгресс  
**22–23 сентября 2026, Москва**

Организатор:



## СРЕДИ ДОКЛАДЧИКОВ 2026



**Виктор Балабанов,**  
президент компании,  
Вольфрам плюс групп



**Виктор Еганов,**  
председатель,  
Союз  
Золотопромышленников  
Урала



**Леонид Гильченко,**  
вице-президент по работе  
с государственными  
органами, Селигдар



**Игорь Елисеев,**  
генеральный директор,  
Гурбей Золото



**Дмитрий Парфёнов,**  
генеральный директор,  
Белое Золото



**Валентин Черняков,**  
генеральный директор  
объединения,  
Золото Якутии



**Сергей Луговец,**  
директор по развитию,  
соучредитель,  
Золотой Альянс



**Богдан Браговский,**  
руководитель по цифровым  
инициативам,  
Управляющая компания  
Полюс



**Зарета Тайди,**  
руководитель горнорудной  
отрасли,  
Корпорация развития  
Дальнего Востока и Арктики

Среди постоянных участников:



**GOLDMININGRUS.COM**

[events@vostockcapital.com](mailto:events@vostockcapital.com)

ISSN 2079—3332  
e-ISSN 3034—6835

## Научно-технический и производственный журнал



**Т. 26, № 3**  
**МАЙ – ИЮНЬ 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: 09.07.2026

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, № 3**  
**MAY – JUNE 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: 09.07.2026

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

## НЕКРОЛОГ

Давид Родионович Каплунов: ученый, педагог, создатель научной школы

5

## ОБОГАЩЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*Р. С. Вopilin, В. А. Иодис*

Изучение влияния СВЧ-волн на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной руды

9

*А. А. Авреитсевич, В. А. Иодис*

Исследование изменений в морфологии окисленной поверхности сульфидной руды при ее ультразвуковой обработке

15

*Р. Д. Пряжевский, В. А. Атрушкевич, Е. Ю. Барменков*

Алгоритм решения контактных задач с использованием технологий глубокого машинного обучения при переработке полезных ископаемых

21

*Р. А. Юсубалиев, Е. С. Орынгожин, М. К. Джексенов, Е. Е. Орынгожа, Н. А. Милетенко*

Бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотного раствора при подземном выщелачивании урана

27

## ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ

*А. Ю. Ерошев, С. И. Фомин*

Определение рациональных параметров «выемочной единицы» для горнотехнических условий открытой разработки фосфоритовых месторождений

33

*А. Н. Дулин, Б. Г. Догузov*

Обоснование мощности потолочины камер при разработке обводненных месторождений гипса

39

## РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА, ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

*Н. Ю. Трошков*

Параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва

45

*И. Н. Горшенков*

Оценка газодинамической опасности угольных пластов в зависимости от неоднородности микроструктуры угля

50

## ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

*А. К. Кирсанов, А. С. Ткаченко, С. А. Богомолов*

Исследование масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород методом конечно-дискретных элементов в программном комплексе PROROCK 2.0

56

*Е. С. Орынгожин, Р. А. Юсубалиев, М. К. Джексенов, Е. Е. Орынгожа, Н. А. Милетенко*

Механико-математическая модель расчета деформированного состояния кровли камер подземного скважинного выщелачивания урана

62

## OBITUARY

David Rodionovich Kaplunov: scientist, educator, founder of a scientific school

## MINERALS PROCESSING AND BENEFICIATION

*R. S. Vopilin, V. A. Iodis*

Study of the influence of microwaves on selective disintegration of sulfide ore particles

*A. A. Avreitseich, V. A. Iodis*

Study of changes in the morphology of the oxidized surface of sulfide ore during its ultrasonic treatment

*R. D. Pryazhevsky, V. A. Atrushkevich, E. Yu. Barmenkov*

An algorithm for solving contact problems using deep machine learning technologies in mineral processing

*R. A. Yusubaliev, Ye. S. Oryngozhin, M. K. Djexenov, Ye. Ye. Oryngozha, N. A. Miletenko*

An acid-free method for increasing the oxidation-reduction potential of uranium in-situ leaching recycle solution

## GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES

*A. Yu. Eroshev, S. I. Fomin*

Determination of «mining unit» rational parameters for the opencast mining conditions of phosphorite ore deposits

*A.N. Dulin, B. G. Doguzov*

Justification of the capacity of the chamber ceiling during the development of flooded gypsum deposits

## MINE AEROGAS DYNAMICS, MINING THERMOPHYSICS

*N. Yu. Troshkov*

Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing

*I. N. Gorshenkov*

Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on the heterogeneity of coal microstructure

## GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION

*A. K. Kirsanov, A. S. Tkachenko, S. A. Bogomolov*

Study of scale effect under uniaxial compression of rocks using the finite-discrete element method in the “PROROCK 2.0” software

*Ye. S. Oryngozhin, R. A., Yusubaliev, M. K. Djexenov, Ye. Ye. Oryngozha, N. A. Miletenko*

A mechanical-mathematical model for calculating the deformed state of the roof of uranium in-situ leaching

*Е. В. Кайгородова, М. С. Тутанова, О. В. Старостина,  
А. М. Капшук*

Анализ и перспективы интеграции современных  
методов дистанционного геодезического мониторинга  
техногенных объектов

*С. М. Данильев, О. М. Шнюкова, Н. А. Данильева*

Обоснование технологии локального прогноза  
удароопасности методом естественного электромагнитного  
излучения в подземных условиях рудника Скалистого  
Норильского рудного района

*С. С. Кубрин, И. Е. Шиповский*

Методология цифрового моделирования переходных  
процессов разрушения массива горных пород

*С. С. Саркисян*

Современные методы крепления горных выработок

*E. V. Kaygorodova, M. S. Tutanova, O. V. Starostina,  
A. M. Kapshuk*

68 Analysis and prospects for the integration of modern methods  
of remote geodetic monitoring of man-made structures

*S. M. Daniliev, O. M. Shnyukova, N. A. Danilieva*

74 Justification of the technology of local impact hazard  
prediction using natural electromagnetic radiation in the  
underground conditions of the Skalisty mine in the Norilsk ore  
district

*S. S. Kubrin, I. E. Shipovskii*

80 Methodology for digital modeling of transient rock mass  
failure processes

*S. S. Sargsyan*

86 Modern methods of fastening mining workings

## Давид Родионович Каплунов: ученый, педагог, создатель научной школы

Ю. В. Дмитрак<sup>✉</sup>, Н. А. Милетенко

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

✉ [dmitrak@yandex.ru](mailto:dmitrak@yandex.ru)

**Для цитирования:** Дмитрак Ю.В., Милетенко Н.А. Давид Родионович Каплунов: ученый, педагог, создатель научной школы. Маркшейдерия и недропользование. 2026; 26 (3): 5-8. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-5-8>.

6 июня 2026 года ушел из жизни член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук Давид Родионович Каплунов.

Уход из жизни Давида Родионовича – тяжелая утрата для отечественной горной науки, коллектива Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, для его учеников, коллег и всех, кому посчастливилось работать рядом с ним.

С именем Давида Родионовича связана целая эпоха в развитии представлений о закономерностях освоения и сохранения недр Земли, проектировании горнотехнических систем, комплексном использовании георесурсов и об экологически ответственной стратегии недропользования. Он принадлежит к числу тех ученых, чьи труды не только отражают уровень своего времени, но и во многом определяют направления развития науки на десятилетия вперед.

Давид Родионович Каплунов – ведущий специалист России в области комплексного освоения рудных месторождений, подземной и комбинированной геотехнологии, теории проектирования горнотехнических систем. Его научная деятельность является важнейшей частью становления горных наук как целостной системы знаний о техногенном преобразовании недр Земли. Именно он внес весомый вклад в обоснование нового понимания предмета горных наук, их структуры, содержания и перспективных задач. Работы Давида Родионовича во многом способствовали формированию современного взгляда на недра не только как на источник полезных ископаемых, но и как на сложную природно-техническую среду, требующую научно выверенного, комплексного и ответственного освоения.

Путь Давида Родионовича в науке был последовательным и исключительно плодотворным. После работы в горно-химической промышленности в 1958 году он поступил в очную аспирантуру Института горного дела АН СССР, которую успешно окончил, защитив кандидатскую диссертацию, посвященную исследованию системы этажного принудительного обрушения. Уже на раннем этапе научной деятельности он проявил качества, которые в дальнейшем определили его как ученого: умение видеть за частной задачей более широкую закономерность, стремление к инженерной конкретности, интерес к реальным условиям производства и глубокое понимание перспектив развития отрасли. В последующие



годы, работая младшим, а затем старшим научным сотрудником ИГД АН СССР, он последовательно расширял круг исследований, связывая фундаментальные положения с задачами практики.

Особое место в формировании Давида Родионовича как ученого принадлежало его учителям. В материалах о нем с полным основанием его учителями называют академика АН СССР М. И. Агошкова и отца Давида Родионовича – профессора Р. П. Каплунова. Это была не только преемственность поколений, но и преемственность научной культуры: высокой требовательности к результату, уважения к инженерному

знанию, внимания к логике проектного решения. Давид Родионович не только продолжил эти направления, но и вывел их на качественно новый уровень.

С 1977 года, после создания Института проблем комплексного освоения недр АН СССР, Давид Родионович возглавил лабораторию теории проектирования подземной разработки месторождений при комплексном освоении недр. Этот этап стал одним из наиболее значимых в его научной биографии. Под его руководством и при его непосредственном участии были получены фундаментальные результаты в области создания систем управления качеством добываемого минерального сырья при подземной разработке рудных месторождений. Им были выявлены факторы, влияющие на стабильность качества выдаваемой руды, предложены критерии оценки качества рудопотоков, обоснованы принципы стабилизации качества сырья в условиях ухудшения горно-геологических условий разработки. Эти исследования имели большое значение для железорудных, горно-химических и угольных предприятий, переходивших на подземную добычу и работавших во все более сложных условиях значительных глубин.

Одним из важнейших направлений исследований Давида Родионовича стало обоснование производственной мощности подземных рудников в связи со стабилизацией качества добываемой руды. Им были сформулированы и решены проблемы выбора параметров рудопотоков, обеспечивающих требуемую стабильность качества минерального сырья, а также обоснования производственной мощности рудников в масштабе горнопромышленного региона. Принципиально важно, что еще в конце 1970-х годов в этих работах были заложены идеи, ставшие предвестниками цифровизации управления горным производством. Использование моделирования для имитации работы шахты, оценки извлечения руды, определения сроков ввода новых забоев, управления качеством рудопотоков стало важным шагом в развитии вычислительных методов в горной науке.

Базовая монография Д. Р. Каплунова и И. А. Манилова «Стабилизация качества руды при подземной добыче» на протяжении десятилетий оставалась настольной книгой для специалистов отрасли.

Неслучайно сегодня в ИПКОН РАН успешно развивается отдел моделирования и управления горнотехническими системами, созданный по инициативе Давида Родионовича, а в институте сформировалось научное направление по разработке фундаментальных основ моделирования, автоматизации и роботизации процессов горного производства для обеспечения оптимального управления и устойчивого функционирования горнотехнических систем.

В 1980-е годы Давид Родионович выступил как один из ведущих исследователей в области технического перевооружения подземных рудников и повышения интенсивности эксплуатации месторождений. Им была впервые обоснована интенсивность эксплуатации месторождения как интегральный количественный показатель, отражающий одновременно влияние геологических условий и уровня совершенства применяемых технологических решений, технических средств, организации труда и производства. Этот подход позволил по-новому оценивать возможности развития рудников, связывая их не только с наличием запасов, но и с динамикой технического прогресса. За исследования и обоснование направлений освоения минерально-сырьевой базы и технического перевооружения подземных рудников и карьеров Да-

вид Родионович в составе авторского коллектива в 1982 году был удостоен премии Совета министров СССР.

Знаковым рубежом для Давида Родионовича стала защита им в 1986 году докторской диссертации «Определение производственной мощности подземных рудников горнопромышленного региона при техническом перевооружении». Эта работа стала важным этапом в систематизации новых научных результатов в области проектирования подземных рудников на базе новых комплексов оборудования и современных систем разработки. По существу, Давид Родионович сформировал научное направление, в рамках которого проектирование рассматривалось не как разовый выбор технических параметров, а как развивающаяся система решений, учитывающая пространственные, временные, технологические и экономические связи. Неслучайно предложенная им научная специальность «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем» вошла в номенклатуру специальностей научных работников по разделу 2.8 «Недропользование, горные науки».

Особое место в наследии Давида Родионовича занимает разработка системного подхода к комплексному освоению месторождений. Уже в середине 1980-х годов им были сформулированы положения, которые не утратили актуальности и сегодня. Он убедительно показал, что комплексному освоению месторождений должен соответствовать комплексный метод проектирования, что выбор проектных решений должен обеспечивать максимальную эффективность освоения с точки зрения разносторонних интересов государства и общества при оптимальной полноте извлечения полезных ископаемых. В его работах обоснована необходимость выявления технико-экономической взаимосвязи проектных задач, сочетания различных технологий, использования выработанных пространств, снижения экологической нагрузки и сбалансированного развития горнорудной и машиностроительной отраслей. Эти идеи стали фундаментом для развития комбинированной геотехнологии, геотехнологии перехода от открытых работ к подземным и последующим исследованиям в области полного цикла комплексного освоения недр.

В 1990-е годы Давид Родионович внес крупный вклад в формирование нового понимания предмета горных наук. В статье «Современные горные науки: предмет, содержание и новые задачи», опубликованной в 1994 году совместно с К. Н. Трубецким и Н. Н. Чаплыгиным, было обосновано расширение предметной области горных наук в связи с возрастающими масштабами проникновения человека в недра и переходом от разработки отдельных месторождений к освоению всех ресурсов недр. Именно в этом контексте было сформулировано новое понимание недр как техногенно изменяемой среды и предложено выделение группы дисциплин «Горная системология», объединяющей теорию проектирования освоения недр, экономику освоения георесурсов, горную экологию и горную информатику. Это был важнейший шаг в развитии горной науки как междисциплинарной области знания, ориентированной не только на добычу, но и на долгосрочные последствия освоения недр для общества и природы.

30 мая 1997 года Давид Родионович Каплунов был избран членом-корреспондентом Российской академии наук по отделению геологии, геофизики, геохимии и горных наук. Это избрание стало закономерным признанием его выдающегося вклада в науку, авторитета среди коллег и значения его работ для развития отечественного недропользования.

Крупнейшим научным направлением, получившим развитие под руководством Давида Родионовича в последующие десятилетия, стала комбинированная геотехнология. Он и его ученики убедительно доказали, что важнейшие и наиболее инерционные проектные решения – от выбора способов добычи до вопросов использования выработанного пространства и повышения полноты извлечения запасов – должны приниматься уже на ранних стадиях проектирования в рамках единой геотехнологической стратегии. Научным итогом этих исследований стало создание методологии установления рациональных параметров строящихся и реконструируемых рудников с комбинированным способом добычи. Особенно значимым было промышленное внедрение комбинированных технологий на месторождениях медно-колчеданных руд Урала, за что Давид Родионович в коллективе авторов был удостоен премии Правительства Российской Федерации в 2002 году.

Начало XXI века ознаменовалось новым этапом его научной деятельности: разработкой концепции полного цикла комплексного освоения недр. Под руководством Давида Родионовича показано, что подлинная эффективность освоения недр и их сохранение могут быть обеспечены только в ходе реализации полного цикла, включающего добычу, переработку природного и техногенного сырья, обязательную утилизацию отходов в выработанных пространствах, а также многофункциональное использование подземных полостей. Им систематизированы геологические процессы, влияющие на формирование и эксплуатацию выработанных пространств, разработаны принципы управления ими, создана классификация горнотехнических систем с учетом возможности многофункционального использования этих пространств. Эти идеи получили крупномасштабное промышленное внедрение при обосновании ресурсосберегающей и экологически сбалансированной геотехнологии комплексного освоения крупнейших месторождений Курской магнитной аномалии, что было отмечено премией Правительства Российской Федерации в 2014 году.

Научные труды Давида Родионовича тесно связаны с практикой. Его разработки нашли применение на месторождениях Кольского полуострова, Казахстана, Центрального и Южного Урала, Якутии, Крайнего Севера, Курской магнитной аномалии. При его непосредственном участии совершенствовались геотехнологии перехода на глубокие горизонты, технологии с закладкой выработанного пространства, схемы перехода от открытых работ к подземным, методы интенсификации проходки капитальных выработок в сложных условиях, решения для освоения глубокозалегающих месторождений Норильского района и алмазосодержащих рудников Якутии. Значителен и его вклад в развитие научного сотрудничества с Казахстаном: еще в 1960-е годы его работы были связаны с выбором систем разработки для месторождений республики, а в дальнейшем он активно участвовал в совместных программах по механизации и интенсификации подземной добычи на рудниках Казахстана.

Давид Родионович – не только выдающийся ученый, но и крупный организатор науки, педагог, создатель научной школы. Им подготовлена плеяда специалистов в области теории проектирования подземной и комбинированной разработки рудных месторождений, полного цикла комплексного освоения недр, устойчивого развития горнотехнических систем. Именно он ввел и детально раскрыл понятие горнотехни-

ческой системы как совокупности технологических подсистем добычи полезных ископаемых и соответствующих им горных конструкций во взаимодействии с осваиваемыми участками недр. Много лет он преподавал, формируя основы инженерного мышления у молодых горняков. Его научная школа отличается сочетанием фундаментальной глубины, инженерной строгости и постоянной связи с производством. Под его руководством и при его участии развились крупные научные направления, были защищены кандидатские и докторские диссертации, проведены научно-практические конференции, ставшие пространством профессионального роста для нескольких поколений исследователей и инженеров.

Большую общественную работу он вел как член редколлегий ведущих журналов горного профиля: «Маркшейдерия и недропользование», «Горный журнал», «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», «Рациональное освоение недр», «Горный информационно-аналитический бюллетень», «Горный журнал Казахстана», «Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле», «Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова».

В воспоминаниях учеников и коллег Давид Родионович предстает не только как ученый высочайшего уровня, но и как человек редкой внутренней собранности, требовательности и масштаба. Он умел видеть главное, четко формулировать проблему, задавать высокую планку научной честности и ответственности. Для многих он был наставником, способным направить, поддержать, помочь найти верное решение и научить мыслить широко, стратегически, в категориях будущего развития отрасли. Именно такие личности формируют научные школы не формально, а по существу, через идеи, стиль работы, культуру обсуждения, личный пример и верность профессии.

Научное наследие Давида Родионовича Каплунова огромно. Оно включает более 350 научных трудов, среди которых фундаментальные монографии, статьи, патенты, словари, учебные пособия, научные редакции коллективных изданий. Его работы по техническому перевооружению рудников, горным наукам как системе знаний об освоении и сохранении недр, комбинированной геотехнологии, геотехнологии перехода от открытых работ к подземным, комплексному освоению месторождений, управлению качеством рудопотоков и развитию ресурсосберегающих геотехнологий стали важной частью современного корпуса знаний в горном деле.

Память о Давиде Родионовиче Каплунове сохранится не только в его книгах и статьях, не только в реализованных на производстве технологиях и в научных направлениях, которые он сформировал. Она будет жить в его учениках, в профессиональной культуре отечественной горной науки, в самой логике современного подхода к освоению недр – системного, комплексного, ответственного, ориентированного на будущее. Несмотря на многочисленные правительственные награды и всемирное признание, Давид Родионович всегда оставался скромным человеком, настоящим интеллигентом своего поколения. Давид Родионович часто говорил, что самая большая ценность для него – это то, что он горный инженер. Его жизнь была примером беззаветного служения науке, горному делу и стране.

Светлая память о Давиде Родионовиче Каплунове, ученом, педагоге, создателе научной школы, навсегда сохранится в наших сердцах.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Юрий Витальевич Дмитрак –**

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

**Наталья Александровна Милетенко –**

канд. техн. наук, ученый секретарь журнала «Маркшейдерия и недропользование», старший научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 10.06.2026

Принята к публикации: 15.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

**Yuri V. Dmitrak –**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Editor-in-chief of the journal "Mine Surveying and Subsurface Use", Chief Researcher, Head of the Department of Modeling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: [dmitrak@yandex.ru](mailto:dmitrak@yandex.ru)

**Natalya A. Miletenko –**

Cand. Sci. (Eng.), Scientific Secretary of the journal "Mine Surveying and Subsurface Use", Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

**Article info**

Received: 10.06.2026

Accepted: 15.06.2026

## Изучение влияния СВЧ-волн на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной руды

Р. С. Вопилин, В. А. Иодис✉

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

✉ [iodisva@mail.ru](mailto:iodisva@mail.ru)

**Резюме.** Работа выполнена с целью изучения влияния СВЧ-волн различной объемной интенсивности (3, 4,54 и 5,3 Вт/см<sup>3</sup>) на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч при различной продолжительности воздействия (60–480 с). Эксперимент показал, что СВЧ-обработка объемной интенсивностью 3 Вт/см<sup>3</sup> (180 с) и 4,54 Вт/см<sup>3</sup> (360 с) не вызывает визуально видимых структурных изменений на поверхности частиц сульфидной руды. Увеличение объемной интенсивности до 5 Вт/см<sup>3</sup> при продолжительности 300 с вызывало как раскрытие существующих микротрещин, так и их образование. Эксперименты показали, что температура руды при объемной интенсивности излучения 3 Вт/см<sup>3</sup> (480 с) обработки достигла 426,2 °С. При 4,54 Вт/см<sup>3</sup> температура руды составила 476,4 °С через 360 с. При максимальной интенсивности температура достигла 468,2 °С через 300 с. При дальнейшей СВЧ-обработке с указанными объемными интенсивностями фиксировались нелинейный рост температуры, замедление ее роста и стабилизация, что свидетельствовало о начале фазовых превращений в руде. Определена зависимость удельной теплоемкости руды от продолжительности процесса при трех данных объемных интенсивностях воздействия. Обработка частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч сверхвысокочастотным излучением позволит за счет раскрытия, формирования микротрещин и роста контактной поверхности облегчить их последующую переработку, в частности интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания с целью выделения из них целевых компонентов.

**Ключевые слова:** сульфидная руда, СВЧ-волна, микроволновое излучение, объемная интенсивность излучения, продолжительность, микротрещина, термомеханические напряжения, тепловое расширение

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Ю. П. Трухину за руководство научной работой, научному сотруднику И. А. Койдану за ценную помощь в проведении микроскопических исследований.

**Для цитирования:** Вопилин Р.С., Иодис В.А. Изучение влияния СВЧ-волн на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной руды. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 9-14. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-9-14>.

## Study of the influence of microwaves on selective disintegration of sulfide ore particles

R. S. Vopilin, V. A. Iodis✉

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

✉ [iodisva@mail.ru](mailto:iodisva@mail.ru)

**Abstract.** The aim of this study was to investigate the effect of microwaves of varying volumetric intensities (3, 4,54, and 5,3 W/cm<sup>3</sup>) on the selective disintegration of cobalt-copper-nickel sulfide ore particles from the Shanuch deposit at varying exposure times (60 – 480 s). The experiment demonstrated that microwave treatment with volumetric intensities of 3 W/cm<sup>3</sup> (180 s) and 4,54 W/cm<sup>3</sup> (360 s) does not cause visually visible structural changes on the surface of the sulfide ore particles. Increasing the volumetric intensity to 5 W/cm<sup>3</sup> for 300 s caused both the opening of existing microcracks and their formation. Experiments showed that the ore temperature at a volumetric radiation intensity of 3 W/cm<sup>3</sup> reached 426,2 °C after 480 s of treatment. At 4,54 W/cm<sup>3</sup>, the ore temperature reached 476,4 °C after 360 s. At maximum intensity, the temperature reached 468,2 °C after 300 s. With further microwave treatment at these intensities, a nonlinear increase in temperature was recorded, followed by a slowdown and stabilization, indicating the onset of phase transformations in the ore. The dependence of the ore's specific heat capacity on the process duration

was determined at these three volumetric intensities. The treatment of particles of cobalt-copper-nickel sulfide ore from the Shanuch deposit with microwave radiation will facilitate subsequent processing by opening, forming microcracks and increasing the contact surface, in particular by intensifying the process of bacterial-chemical leaching, with the aim of isolating target components from them.

**Keywords:** sulfide ore, microwave wave, microwave radiation, volumetric radiation intensity, duration, microcrack, thermomechanical stresses, thermal expansion

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to doctor of technical sciences, professor Yu.P. Trukhin for supervision of the scientific work, and to research associate I.A. Koydan for valuable assistance in conducting microscopic studies.

**For citation:** Vopilin R.S., Iodis V.A. Study of the influence of microwaves on selective disintegration of sulfide ore particles. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 9-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-9-14>.

## Введение

Анализ литературных источников по существующим технологиям обогащения полезных ископаемых позволяет говорить о ряде преимуществ СВЧ-технологий перед традиционными процессами, основанными на дроблении, измельчении, для которых характерны высокие энергозатраты, большие потери целевых компонентов (металлов).

Уникальность использования микроволновых технологий для обогащения руд состоит в их селективном воздействии на разные минералы руды вследствие разной реакции на диэлектрический нагрев [1]. Исследования показали, что многие целевые минералы: пирротин, халькопирит, пирит, пентландит, виоларит – поглощают сверхвысокочастотное излучение и нагреваются, а минералы пустой породы: кварц, кальцит, фторапатит – прозрачны для СВЧ-волн. Селективный нагрев материала, сопровождающийся термическим расширением, приводит к образованию термомеханических напряжений, увеличению ширины раскрытия микротрещин, их образованию, формированию микронарушений на границе зерен, росту в них плотности дислокаций [2–5]. При этом размер данных дефектов зависит не только от интенсивности / продолжительности излучения, но и от минералогического состава, текстуры руды [6]. Раскрытие микротрещин, их образование способствует дезинтеграции минерала, что обеспечивает доступ выщелачивающего агента к ценным компонентам руды и увеличивает эффективность извлечения металла в процессах кислотного, бактериально-химического выщелачивания [7]. Данный эффект может возникнуть при выходных мощностях микроволнового излучения от 0,147 до 7 кВт, в течение 0,5–200 мин., с температурой нагрева рудных фаз от 25 до 750 °C [8, 9].

**Цель работы:** изучение влияния СВЧ-волн различной интенсивности на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при различной продолжительности воздействия.

## Материал и методы исследования

**Руда.** Для исследования образования микротрещин, их раскрытия вследствие термомеханических напряжений на поверхности сульфидов металлов использовалась измельченная окисленная сульфидная кобальт-медно-никелевая руда месторождения Шануч [10]. Степень измельчения руды 100 % класса – 100 мкм. Исходное содержание металлов в образце руды: 3,1 % Ni; 0,48 % Cu; 0,1 % Co. Сульфиды представлены пирротинном ( $\text{FeS}_{n+1}$ ), пиритом ( $\text{FeS}_4$ ), виоларитом ( $\text{FeNi}_2\text{S}_4$ ), халькопиритом ( $\text{CuFeS}_2$ ), пентландитом ( $\text{Fe, Ni}_3\text{S}_4$ ).

**СВЧ-нагреватель.** В качестве СВЧ-нагревателя использовалась микроволновая печь марки MWD-201 WH номинальной потребляемой мощностью 1 100 кВт, максим-

альной выходной мощностью излучения – 700 Вт, частотой – 2 450 МГц, полезным объемом – 16,8 л.

## Описание эксперимента

В целях подтверждения исследования образования микротрещин на поверхности сульфидов металлов были выполнены эксперименты по СВЧ-воздействию на измельченную кобальт-медно-никелевую руду.

Образцы руды размером 10 мм измельчались на планетарной шаровой мельнице, затем измельченную руду разделяли путем классификации на ситовом грохоте. Руду массой 200 г засыпали в термостойкую стеклянную емкость объемом 132 мл, которую устанавливали в центр микроволновой печи.

Объемные интенсивности излучения при соответствующих выходных мощностях излучения 400, 600 и 700 Вт составляли 3, 4,54 и 5,3 Вт/см<sup>3</sup> соответственно. Максимальная продолжительность обработки (400 Вт) при данных интенсивностях составляла 480 с, 360 с (600 Вт), минимальная – 300 с (700 Вт). Для каждого режима (интенсивность/ продолжительность) эксперимент повторялся три раза. В течение всех экспериментов каждые 60 с фиксировалась температура в центре слоя руды измерителем температуры марки ИРТ-4/16-Т с термоэлектрическим преобразователем температуры типа L (ТХК). После воздействия СВЧ-излучения руду вынимали, и ее поверхность исследовалась с помощью рудного поляризационного микроскопа. Для получения микроскопических кадров одних и тех же частиц до и после СВЧ-обработки в боросиликатном жаропрочном стекле (2 × 5 см) были высверлены, а затем отшлифованы углубления для 24 частиц руды высотой 2 мм, диаметром 4 мм.

## Результаты исследований и обсуждение

Анализ микроскопических кадров, представленных на рисунках 1а–1г, показал, что СВЧ-воздействие объемной интенсивностью обработки 3 Вт/см<sup>3</sup> (180 с), 4,54 Вт/см<sup>3</sup> (240 с) не вызывает визуально видимых структурных изменений на поверхности частиц сульфидной руды.

Увеличение продолжительности микроволновой обработки интенсивности 4,54 Вт/см<sup>3</sup> до 360 с также не показало визуально заметных структурных изменений на поверхности частиц (рис. 1д, 1е). Однако увеличение объемной интенсивности до 5 Вт/см<sup>3</sup> при продолжительности 300 с (рис. 1ж, 1з) вызвало как раскрытие уже существующих трещин, так и образование микротрещин.

Увеличение продолжительности воздействия СВЧ-волн максимальной интенсивности до 600 с привело к разрушению частицы руды (рис. 2).

Микроскопические исследования подтверждают, что структурные изменения частиц руды, а именно раскрытие микротрещин, микрорастрескивание, вследствие высоких

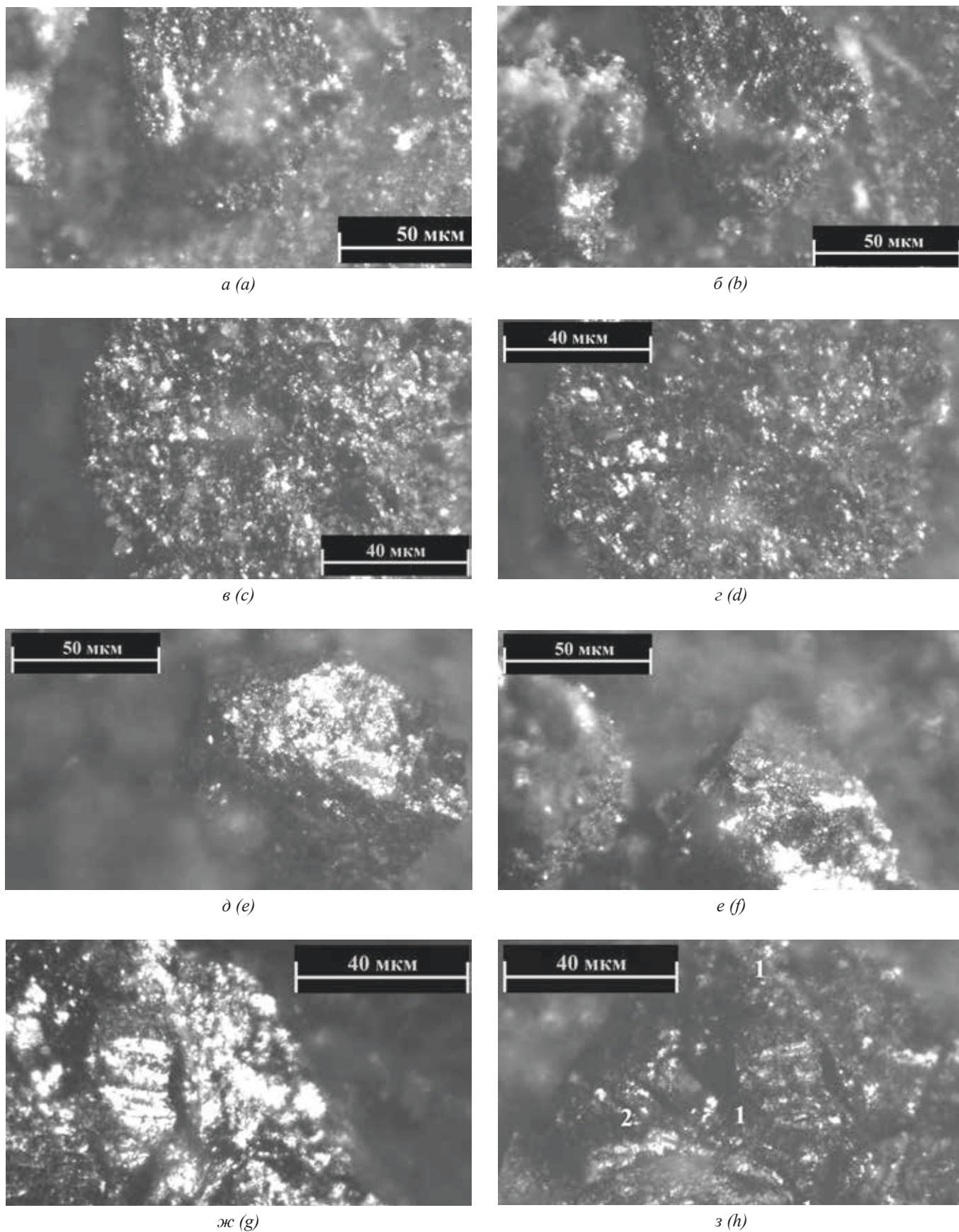


Рис. 1. Микроскопические кадры частиц сульфидной руды до и после СВЧ-воздействия: а, в, д, ж – до обработки; б – после обработки 400 Вт/см<sup>2</sup>(180 с); г – после обработки 600 Вт/см<sup>2</sup>(240 с); е – после обработки 600 Вт/см<sup>2</sup>(360 с); з – после обработки 700 Вт/см<sup>2</sup>(300 с); 1 – раскрытие микротрещин; 2 – образованные микротрещины /

Fig. 1. Microscope images of sulfide ore particles before and after microwave exposure: а, в, д, ж – before treatment; б – after treatment at 400 W/cm<sup>2</sup> (180 s); д – after treatment at 600 W/cm<sup>2</sup> (240 s); ф – after treatment at 600 W/cm<sup>2</sup> (360 s); h – after treatment at 700 W/cm<sup>2</sup> (300 s); 1 – opening of microcracks; 2 – formed microcracks

термомеханических напряжений, является результатом различного теплового расширения минералов в частицах руды под воздействием микроволн [11]. Разрушение идет по границам раздела минералов, местам включений, спайкам кристаллов и другим дефектам [12].

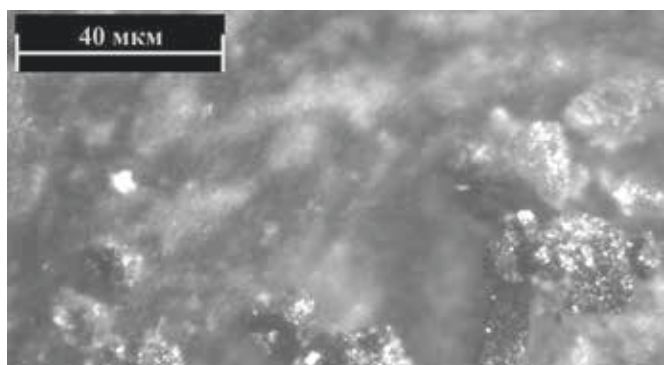


Рис. 2. Микроскопический кадр разрушенной частиц сульфидной руды после СВЧ-воздействия (5,3 Вт/см<sup>3</sup>, 600 с) /

Fig. 2. Microscope image of destroyed sulfide ore particles after microwave exposure (5,3 W/cm<sup>3</sup>, 600 s)

Обработка частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч сверхвысокочастотным излучением позволит за счет формирования на их поверхности микротрещин и роста контактной поверхности облегчить их последующую переработку, в частности интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания с целью выделения из них целевых компонентов [13–16].

Анализ, исследование образования микронарушений сплошности горных пород в условиях распространения в их объеме СВЧ-волн требует фиксации температур руды в течение эксперимента. Эксперименты показали, что температура руды при объемной интенсивности излучения 3 Вт/см<sup>3</sup> за 480 с обработки достигала 426,2 °С. При 4,54 Вт/см<sup>3</sup> температура микроволнового воздействия составила 476,4 °С через 360 с. При максимальной интенсивности температура достигала 468,2 °С через 300 с. При дальнейшей СВЧ-обработке с данными интенсивностями фиксировался нелинейный рост температуры, замедление ее роста – стабилизация, что свидетельствовало о начале фазовых превращений в руде [6].

Замеры температуры в центре слоя руды позволили определить зависимости температуры нагрева и удельной теплоемкости от времени.

Удельную теплоемкость, кДж/кг·°С определяли калориметрическим методом:

$$c = \frac{P \cdot \tau}{\Delta t \cdot M}, \quad (1)$$

где  $P$  – выходная мощность излучения, Вт;

$\tau$  – продолжительность воздействия, с;

$\Delta t$  – нагрев частиц руды, °С;

$M$  – масса руды, 0,2 кг.

Начальную теплоемкость руды определяли калориметрическим методом с использованием измерителя плотности теплового потока марки ИПП-2.

Нахождение обобщенной зависимости  $c(\tau)$  для трех режимов эксперимента позволит в дальнейшем определять температуру нагрева руды в любой момент продолжительности эксперимента (рис. 3).

Эксперимент показал, что теплоемкость при нагревании СВЧ-волнами увеличивается линейно в температурном диапазоне 22,3–476,4 °С, что подтверждается работами [17].

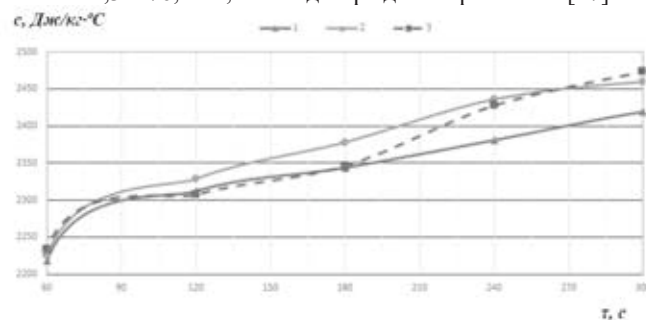


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от продолжительности СВЧ-воздействия: 1–3 Вт/см<sup>3</sup>; 2–4,54 Вт/см<sup>3</sup>; 3–5 Вт/см<sup>3</sup> /

Fig. 3. Dependence of specific heat capacity on the duration of microwave exposure: 1–3 W/cm<sup>3</sup>; 2–4,54 W/cm<sup>3</sup>; 3–5 W/cm<sup>3</sup>

На основе экспериментальных данных получены уравнения для трех режимов различной выходной мощности СВЧ излучения:

$$c(\tau) = -0,00212\tau^2 + 1,549\tau + 2140; \quad (2)$$

$$c(\tau) = -0,00304\tau^2 + 2,051\tau + 2116; \quad (3)$$

$$c(\tau) = 0,00125\tau^2 + 0,588\tau + 2192; \quad (4)$$

и обобщенная зависимость:

$$c(\tau) = -0,000928\tau^2 + 1,202\tau + 2159. \quad (5)$$

### Закключение

1. Изучение влияния СВЧ-волн различной интенсивности на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при различной продолжительности воздействия показало, что воздействие микроволновой энергией на частицы руды вызывает их структурное изменение – раскрытие микротрещин, растрескивание вследствие термомеханических напряжений, различного теплового расширения минералов.

2. Предварительная обработка частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч сверхвысокочастотным излучением позволит за счет формирования на их поверхности микротрещин и роста контактной поверхности облегчить их последующую переработку, в частности интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания с целью выделения из них целевых компонентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Jones D.A., Kingman S.W., Whittles D.N., et al. Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*. 2005; 18 (7): 659–669.
2. Chen J., Li X., Gao L., et al. Microwave Treatment of Minerals and Ores: Heating Behaviors, Applications, and Future Directions. *Minerals*. 2024; 14 (219): 1–14. <https://doi.org/10.3390/min14030219>.
3. Lin F., Wang Z., Ao Y., et al. A high-power microwave continuous cracking system for hard ores. *Ain Shams Engineering Journal*. 2025; 16: 103440. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103440>.

4. Tian X., Forster J., Bobicki E.R. Technological and economic considerations for the application of combined microwave assisted comminution and multi-sensor ore sorting. *Minerals Engineering*. 2024; 208: 108582. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108582>.
5. Giyani B.F., Batchelor A.R., Kingman S.W. Microwave-enhanced heap leaching of porphyry copper ores: Part 1 – The role of mineralogy in microwave-induced fracture networking measured by X-ray computed tomography. *Minerals Engineering*. 2025; 233: 109589. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109589>.
6. Винников В.А., Землянский Г.С. Исследование изменения величины плотности дислокаций в зернах пирита при его нагреве сверхвысокочастотным излучением. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025; 12: 42-51. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2025\\_12\\_0\\_42](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_12_0_42).  
Vinnikov V.A., Zemlyansky G.S. A study of changes in the dislocation density in pyrite grains upon heating with microwave radiation. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2025; 12:42-51. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2025\\_12\\_0\\_42](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_12_0_42).
7. Трухин Ю.П., Иодис В.А., Хайнасова Т.С. СВЧ и УЗИ активация кинетики бактериально-химических процессов выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; 11 (19): 113-123. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_11\\_19\\_113](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_113).  
Trukhin Yu.P., Iodis V.A., Khainasova T.S. Microwave and ultrasound activation of the kinetics of bacterial-chemical processes of leaching cobalt-copper-nickel ores of the Shanuch deposit. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11 (19): 113-123. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_11\\_19\\_113](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_113).
8. Вopiлин P.C. Выщелачивание руд с использованием СВЧ излучения. Недропользование XXI век. 2025; 4 (108): 98-107.  
Vopilin R.S. Leaching of ores using microwave radiation. *Subsoil use XXI century*. 2025; 4 (108): 98-107. (In Russ.).
9. Iodis V.A. Methods of ore processing by microwave radiation. *Non-Ferrous Metals*. 2023; 2: 14-18. <https://doi.org/10.17580/nfm.2023.02.03>.
10. Кунгурова В.Е. Минеральный и химический состав сульфидной медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка). *Геология, география и глобальная энергия*. 2018; 4 (71): 99-110.  
Kungurova V.E. Mineral and chemical composition of sulfide copper-nickel ore of the Shanuch deposit (Kamchatka). *Geology, Geography and Global Energy*. 2018; 4 (71): 99-110. (In Russ.).
11. Бабищ А.В., Винников В.А. Экспериментальные исследования структурных изменений минеральных зерен пиритосодержащих руд в СВЧ полях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019; 6: 106-114. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114>.  
Babich A.V., Vinnikov V.A. Experimental studies of structural changes in mineral grains of pyrite-containing ores in microwave fields. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019; 6: 106-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114>.
12. Киореску А.В. Механизмы воздействия микроволнового излучения на процессы выщелачивания минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015; 63: 335-339.  
Kiorescu A.V. Mechanisms of influence of microwave radiation on leaching processes. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2015; 63: 335-339. (In Russ.).
13. Olubambi P.A. Influence of microwave on the bioleaching behaviour of low-grade complex sulphide ores. *Hydrometallurgy*. 2009; 95 (1-2): 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.043>.
14. Liu C., Liu H., Long J., et al. Interaction of dry and water-saturated uranium ore with microwave and enhanced extraction of uranium. *Minerals Engineering*. 2023; 196: 108047. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108047>.
15. Киореску А.В. Биовыщелачивание никеля, меди и кобальта из предварительно обработанной СВЧ-излучением руды. *Успехи современного естествознания*. 2019; 12: 51-56. <https://doi.org/10.17513/use.37268>.  
Kiorescu A.V. Bioleaching of Nickel, Copper, and Cobalt from Microwave-Pretreated Ore. *Advances in Current Natural Sciences*. 2019; 12: 51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37268>.
16. Charikinya E., Bradshaw S.M. An experimental study of the effect of microwave treatment on long term bioleaching of coarse, massive zinc sulphide ore particles. *Hydrometallurgy*. 2017; 173: 106-114. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.08.001>.
17. Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Маканов К.М. и др. Характерная температура минимальной энергоёмкости измельчения руд и минералов при нагреве СВЧ-волнами. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020; 9: 65-76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-65-76>.  
Tazhibayev K.T., Sultanaliyeva R.M., Makanov K.M., et al. Characteristic temperature of minimum energy intensity of grinding ores and minerals heated by microwave waves. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 9: 65-76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-65-76>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Роман Сергеевич Вopiлин** – аспирант ФГБУН  
«Научно-исследовательский геотехнологический центр»  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(НИГТЦ ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский,  
Российская Федерация

**Валентин Алексеевич Иодис** –  
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН  
«Научно-исследовательский геотехнологический центр»  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(НИГТЦ ДВО РАН), научный руководитель аспиранта,  
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

## ABOUT THE AUTHORS

**Roman S. Vopilin** –  
postgraduate student of the Research Geotechnological Center,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (RGC FEB  
RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

**Valentin A. Iodis** –  
Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Research  
Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian  
Academy of Sciences (RGC FEB RAS), postgraduate student's  
supervisor, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

**Критерии авторства:**

Р. С. Вopiлин – сбор и анализ данных литературных источников, проведение экспериментальных исследований, определение параметров процесса, подготовка текста статьи, включая описательные методики, оформление рисунков, визуализация данных и корректность их анализа; В. А. Иодис – постановка целей и задач, проведение экспериментальных исследований, интерпретация результатов и их научное обоснование, рецензирование и редактирование текста статьи.

**Конфликт интересов:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 25.03.2026

Поступила после рецензирования: 13.05.2026

Принята к публикации: 26.05.2026

**Contribution:**

R. S. Vopilin – collection and analysis of data from literary sources, conducting experimental studies, determining process parameters, preparing the text of the article, including descriptive methods, designing figures, visualizing data and ensuring the correctness of their analysis; V. A. Iodis – setting goals and objectives, conducting experimental studies, interpreting the results and their scientific justification, reviewing and editing the text of the article.

**Conflict of interest:**

The authors declare no conflict of interest.

**Article info**

Received: 25.03.2026

Revised: 13.05.2026

Accepted: 26.05.2026

## Исследование изменений в морфологии окисленной поверхности сульфидной руды при ее ультразвуковой обработке

А. А. Аврейтевич, В. А. Иодис✉

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

✉ [iodisva@mail.ru](mailto:iodisva@mail.ru)

**Резюме.** Исследованы изменения в морфологии окисленной в атмосферных условиях поверхности сульфидной руды после ее ультразвукового воздействия. Исследования изменений в морфологии поверхности шлифов подтвердили, что ультразвуковая обработка вызывает удаление пассивирующих пленок, значительно изменяет морфологию поверхности, вызывая ее повреждение, вызывая образование дефектов в виде каналов и кратеров. Эксперимент показал, что ультразвуковая обработка объемной интенсивностью от 0,44 до 0,78 Вт/см<sup>3</sup> в течение 15 мин. поверхности шлифов удаляет оксидные пленки с поверхности пирротина и халькопирита только частично. При объемной интенсивности от 0,78 до 1 Вт/см<sup>3</sup> оксидные пленки полностью разрушаются, пирротин и халькопирит подвержены большим изменениям в морфологии с образованием большого количества дефектов. При максимальной объемной интенсивности колебаний 1 Вт/см<sup>3</sup> и увеличении продолжительности процесса обработки до 30 мин. количество каналов и кратеров на поверхности растет. Результаты исследований показывают, что ультразвуковая обработка рудных пульп может увеличить скорость процесса бактериально-химического окисления за счет существенного увеличения количества дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки, роста ее контактной площади и формы. Это позволит разработать инновационные, рентабельные технологии переработки сульфидных руд.

**Ключевые слова:** сульфидная руда, ультразвук, объемная интенсивность излучения, продолжительность, шлиф, оксидная (пассивирующая) пленка, морфология поверхности, дефект

**Благодарности, признательность, финансирование:** Авторы выражают благодарность научному сотруднику научно-исследовательского отдела НИГТЦ ДВО РАН И. А. Койдану за ценные рекомендации при подготовке статьи. Работа выполнена в рамках государственного задания НИГТЦ ДВО РАН № 075-00335-26-00, финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ.

**Для цитирования:** Аврейтевич А.А., Иодис В.А. Исследование изменений в морфологии окисленной поверхности сульфидной руды при ее ультразвуковой обработке. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 15-20. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-15-20>.

## Study of changes in the morphology of the oxidized surface of sulfide ore during its ultrasonic treatment

A. A. Avreitsevich, V. A. Iodis✉

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

✉ [iodisva@mail.ru](mailto:iodisva@mail.ru)

**Abstract.** The study was conducted to investigate changes in the morphology of atmospherically oxidized sulfide ore surfaces after ultrasonic treatment. Studies of the surface morphology of polished sections confirmed that ultrasonic treatment removes passivating films and significantly alters the surface morphology, causing damage and leading to the formation of defects such as channels and craters. The experiment showed that ultrasonic treatment of polished sections with a volumetric intensity of 0,44 to 0,78 W/cm<sup>3</sup> for 15 minutes only partially removes oxide films from the surface of pyrrhotite and chalcopyrite. At a volumetric intensity of 0,78 W/cm<sup>3</sup> to 1 W/cm<sup>3</sup>, the oxide films are completely destroyed, and pyrrhotite and chalcopyrite undergo significant changes in morphology, forming numerous defects. With a maximum volumetric oscillation intensity of 1 W/cm<sup>3</sup> and an increase in the processing time to 30 minutes, the number of channels and craters on the surface increases. The results of the research show that ultrasonic treatment of ore pulps can increase the rate of bacterial-chemical oxidation by significantly increasing the number of defects in the surface layers

of the crystal lattice, increasing its contact area and shape. This will enable the development of innovative, cost-effective technologies for processing sulphide ores.

**Keywords:** sulfide ore, ultrasound, volumetric radiation intensity, duration, polished section, oxide (passivating) film, surface morphology, defect

**Acknowledgments, funding, financial Support:** The authors express their gratitude to I.A. Koydan, a research fellow at the research department of the RGC FEB RAS, for his valuable advice during the preparation of this article. This work was supported by state assignment №075-00335-26-00 to the RGC FEB RAS, funded by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation.

**For citation:** Avreitsevich A.A., Iodis V.A. Study of changes in the morphology of the oxidized surface of sulfide ore during its ultrasonic treatment. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-15-20>.

## Введение

Одним из методов интенсификации физико-химических свойств рудных пульп для повышения эффективности извлечения полезных компонентов является акустическая (ультразвуковая) обработка, вследствие явлений кавитации – образования пузырьков парогазовой смеси в рудных пульпах и их схлопывания, сопутствующих эффектов – акустических течений, радиационного давления, электрических разрядов, кумулятивных струй [1–3].

Схлопывание кавитационных пузырьков на границе раздела фаз в зоне развитой кавитации создает локальные ударные волны с очень высокими амплитудами давления до 8 МПа и температуры до 10 тыс. К [4]. Акустические течения способны разрушить оксидные пленки на поверхности рудных частиц [5, 6]. Кумулятивные струи при воздействии на устья микротрещин рудных частиц способны вызвать их рост и диспергацию частиц [7, 8]. Кроме этого, ударные волны на поверхности рудных частиц способны вызывать увеличение плотности поверхностных дислокаций кристаллических решеток [9, 10], разрушение минеральных агрегатов с повышением удельной суммарной поверхности минеральных компонентов пульп [11, 12].

Совокупность следствий ультразвукового воздействия на минеральные компоненты пульп должно соответственно сопровождаться повышением кинетики процессов обогащения руд, таких как окислительное выщелачивание, бактериально-химическое окисление сульфидов металлов [13, 14]. Интенсификация бактериально-химических процессов с ультразвуковой активацией рудных пульп позволит разработать рентабельные, экологически безопасные технологии для переработки сульфидных кобальт-медно-никелевых руд месторождений никеленосных провинций Дальнего Востока.

**Цель работы:** исследование изменений в морфологии окисленной в атмосферных условиях поверхности сульфидной руды при ультразвуковой обработке с различными объемами интенсивностями.

## Материал и методы исследования

При решении поставленных задач применялись такие методы, как обобщение, систематизация, сравнительный анализ, наблюдение и эксперимент.

### Аппарат ультразвуковой обработки

Аппарат для проведения исследования имел возможность регулирования объемную интенсивность ультразвуковых колебаний от 0,44 до 1,67 Вт/м<sup>3</sup> [15, 16]. Зона развитой кавитации аппарата ультразвуковой обработки (АУО) составляет ≈ 40–43 % от рабочего объема аппарата и занимает почти весь

объем под излучателем колебаний, при этом падение интенсивности в соответствии с расчетами по глубине аппарата составляет менее 1 %.

**Аншлифы.** Для исследования эффективности разрушения ультразвуком пассивирующих образований на поверхности сульфидов металлов использовались два аншлифа сульфидных руд. Аншлиф № 1 представляет собой амфиболит порфириновый с вкраплениями сульфидов – пирротина ( $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ ), халькопирита ( $\text{CuFeS}_2$ ), пентландита ( $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{S}_4$ ), с содержанием, по данным полуколичественного спектрального анализа, целевых металлов: Ni – 0,015 %; Co – 0,005 %; Cu – 0,03 %; Zn – 0,0052 %. Аншлиф № 2 имеет вкрапления руды в амфиболовом габброиде зеленовато-серого цвета. Главный его минерал – пирротин. Акцессорные минералы – халькопирит, пирит ( $\text{FeS}_2$ ), пентландит. Выделения пирротина, значительно окисленного, имеют размер от 0,5 мм, в пятнах – до 5 × 10 мм. Присутствует халькопирит ~ 2–3 %. Количество сульфидов в образце – 10–15 %. Химический анализ сульфидной руды образца показал следующее содержание металлов: Ni – 0,709 %; Co – 0,0139 %; Cu – 0,1047 %; Zn – 0,0052 %.

**Дистиллированная вода.** В эксперименте использовалась дистиллированная вода с плотностью 999 кг/м<sup>3</sup> при 21 °С, pH воды варьировался в пределах 5,5–5,7, значение Eh составляло 97 мВ.

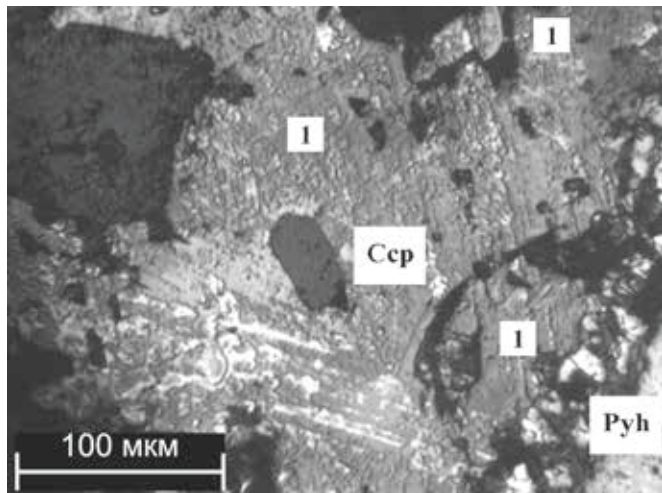
## Описание эксперимента

В целях подтверждения эффективности снятия ультразвуком пассивирующих образований на поверхности кристаллов сульфидов металлов были выполнены эксперименты по ультразвуковому разрушению оксидных пленок, образованных на поверхности аншлифов в атмосферных условиях. Окисленные аншлифы устанавливались на дно АУО, сверху на который устанавливалась пьезоэлектрическая колебательная система с излучателем, при этом нижний конец излучателя располагался выше аншлифов на 7–8 см [15, 16]. Реактор заполнялся дистиллятом, без обеспечения его циркуляции. Во избежание роста температуры дистиллята вследствие трансформации акустической энергии, кавитационного эффекта, вязкостного трения в охлаждающий контур подавали воду с температурой 11 °С, объемным расходом 1,2 л/мин и включали генератор ультразвуковых колебаний с заданными объемными интенсивностями излучения – 0,44; 0,78; 1 Вт/см<sup>3</sup>. Продолжительность обработки при данных интенсивностях составляла 15 мин. После ультразвукового воздействия аншлифы вынимали из АУО и их поверхность исследовалась с помощью рудного поляризационного микроскопа.

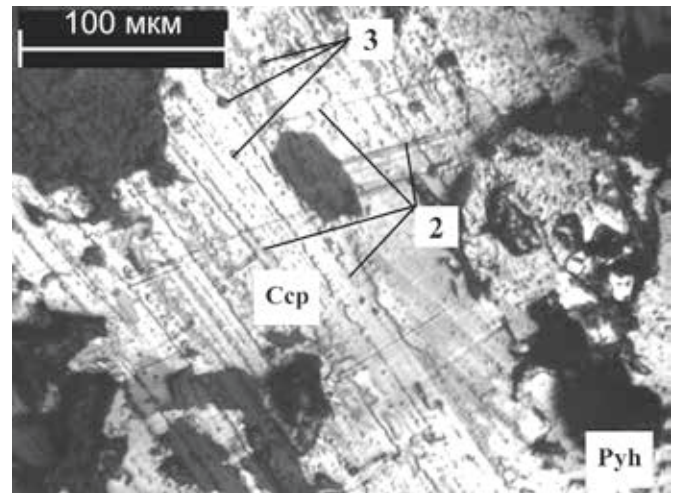
# Результаты и обсуждение исследования

Анализ микроскопических кадров, представленных на рисунке 1, показал, что ультразвуковое воздействие объем-

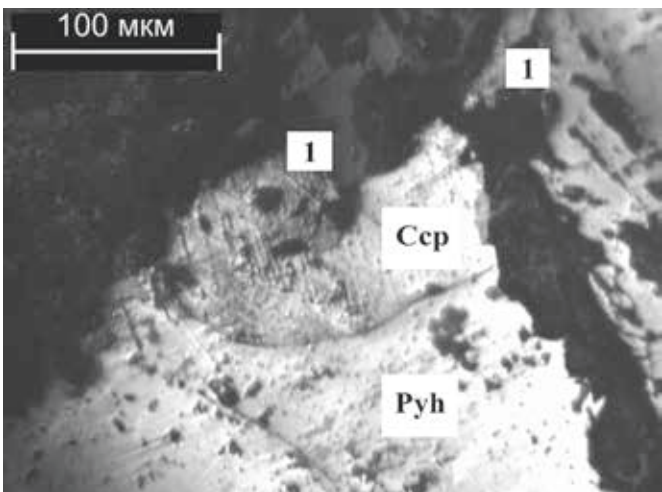
ной интенсивностью от 0,44 до 0,78 Вт/см<sup>3</sup> в течение 15 мин. не полностью удаляет оксидные пленки, мало влияет на морфологию поверхности пирротина (рис. 1е).



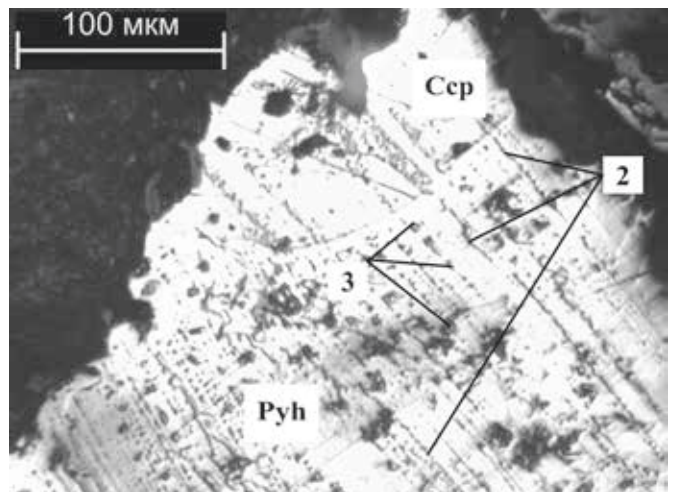
а (a)



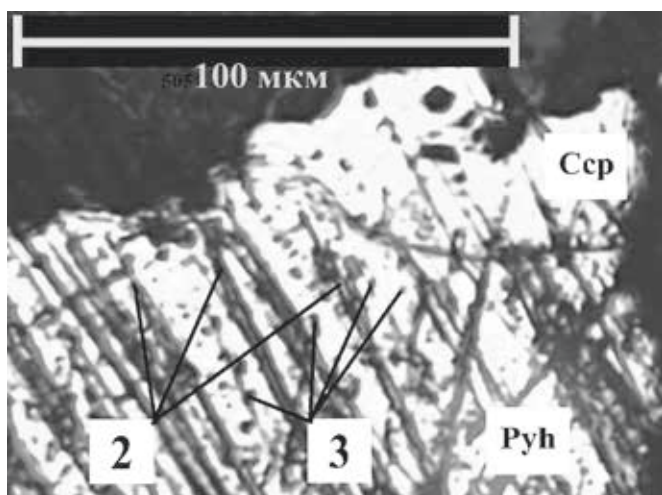
б (b)



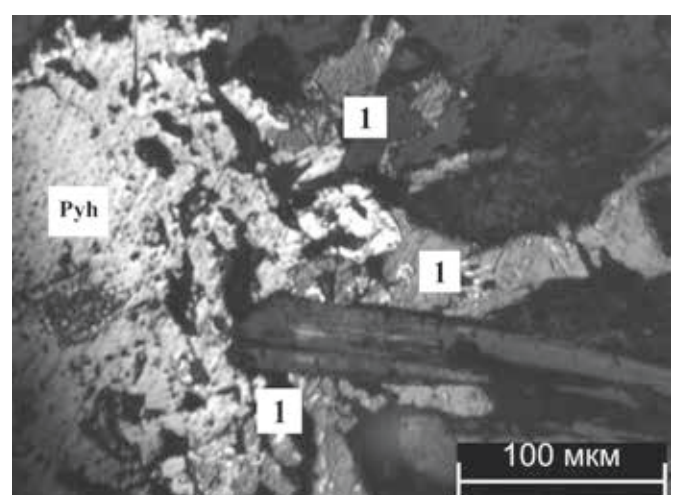
в (c)



г (d)



д (e)



е (f)

Рис. 1. Микроскопический кадр аншлифа № 1 до и после ультразвуковой обработки с различными объемными интенсивностями: а, в – до обработки; б, г – после обработки 0,78 Вт/см<sup>3</sup>; д – после обработки 1 Вт/см<sup>3</sup>; е – после обработки 0,44 Вт/см<sup>3</sup>; 1 – оксидные пленки; 2 – образованные каналы; 3 – образованные кратеры; Pyh – пирротин; Ccp – халькопирит /

Fig. 1. Microscopic image of polished section №1 before and after ultrasonic treatment with different volume intensities: а, с – before treatment; б, d – after treatment with 0,78 W/cm<sup>3</sup>; е – after treatment with 1 W/cm<sup>3</sup>; f – after treatment with 0,44 W/cm<sup>3</sup>; 1 – oxide films; 2 – formed channels; 3 – formed craters; Pyh – pyrrhotite; Ccp – chalcopyrite

При интенсивности  $0,78 \text{ Вт/см}^3$  пассивирующие пленки, образованные в атмосферных условиях, удаляются с образованием на поверхности дефектов: каналов и кратеров (рис. 1б, 1г). Рост объемной интенсивности до  $1 \text{ Вт/см}^3$  увеличил количество механических дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки, их размеры (рис. 1д). При этом пирротин претерпевает более выраженные морфологические изменения поверхности по сравнению с халькопиритом, что возможно обусловлено различиями морфологии кристаллов [17].

Результаты эксперимента полностью подтвердились при ультразвуковой обработке окисленного в атмосферных условиях аншлифа № 2 (рис. 2), где при объемной интенсивности ультразвука  $\geq 0,78 \text{ Вт/см}^3$  были удалены пассивирующие пленки, наблюдались изменения в морфологии поверхности (рис. 2б, 2в). Как и в эксперименте с аншлифом № 1, рост интенсивности воздействия, увеличение продолжительности обработки (рис. 3) ведут к увеличению количества дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки.

Наблюдаемые значительные изменения в морфологии поверхности пирротина и халькопирита при ультразвуковой

обработке, характеризующиеся их сильным повреждением, образованием дефектов в виде многочисленных каналов и кратеров (рис. 1д, 2в, 3), будут способствовать увеличению площади контакта сульфидов с бактериальной суспензией, что может увеличить кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания.

Микроскопические исследования поверхностей аншлифа подтверждают, что в зоне развитой кавитации АУО, происходит эффективное разрушение поверхностных, окисдных пленок, образование дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки. Об этом свидетельствуют результаты данных исследований и результаты исследований [18, 19], где по данным микроанализа обнаружено, что в результате ультразвуковой обработки с поверхности пирротина, халькопирита полностью удаляются окисленные слои (оксиды / гидроксиды железа, полисульфидные соединения), на поверхности образуются многочисленные каналы и кратеры, что ведет к росту контактной поверхности, а это в свою очередь может увеличить кинетику биоэлектрохимических процессов контактного бактериально-химического окисления сульфидов металлов [14].

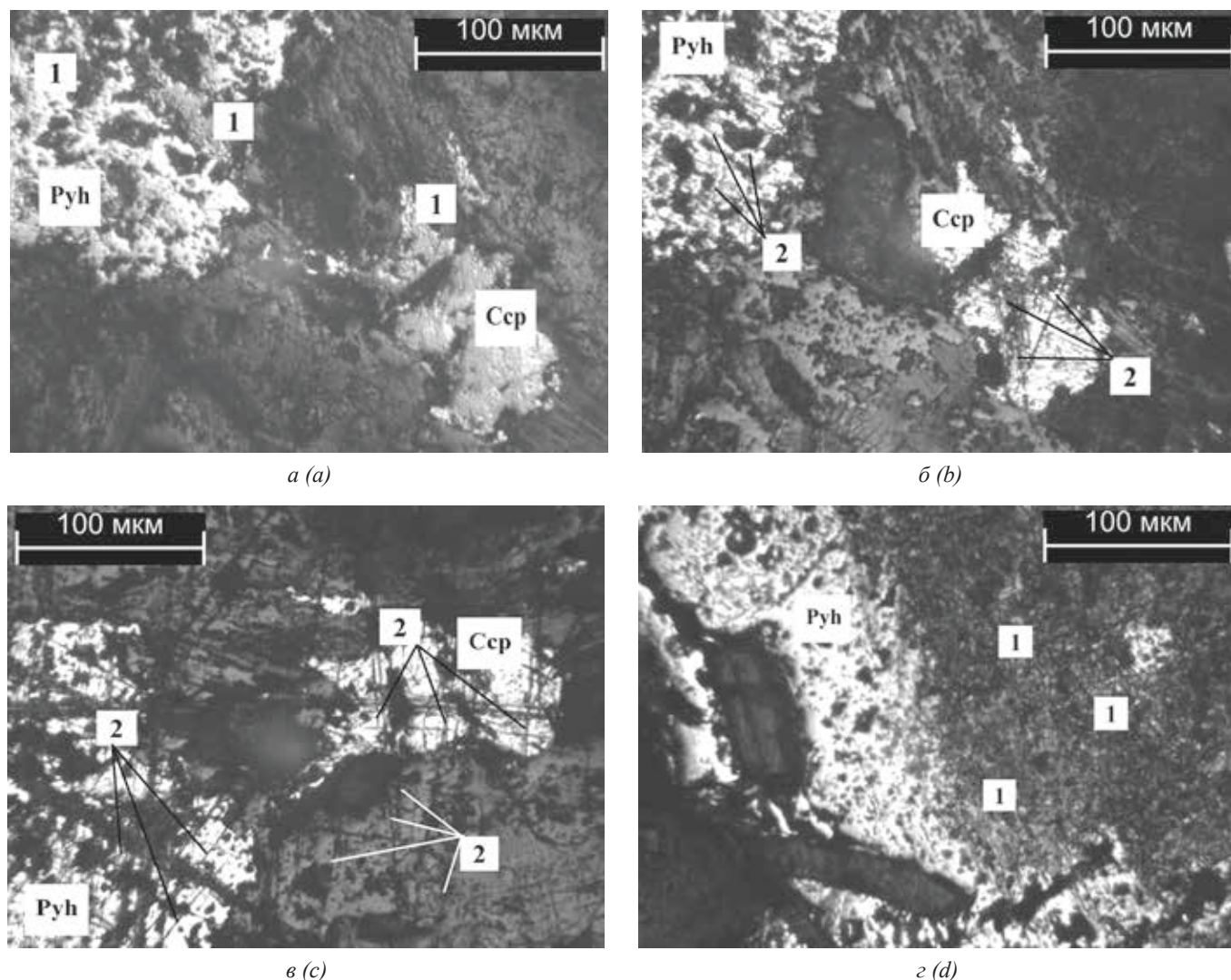


Рис. 2. Микроскопический кадр аншлифа № 2 до и после ультразвуковой обработки с различными объемными интенсивностями: а - до обработки; б - после обработки  $0,78 \text{ Вт/см}^3$ ; в - после обработки  $1 \text{ Вт/см}^3$ ; г - после обработки  $0,44 \text{ Вт/см}^3$ ; 1 - окисдные пленки; 2 - образованные каналы; Pyh - пирротин; Ccp - халькопирит /

Fig. 2. Microscopic image of polished section No.2 before and after ultrasonic treatment with different volume intensities: а - before treatment; б - after treatment with  $0,78 \text{ W/cm}^3$ ; в - after treatment with  $1 \text{ W/cm}^3$ ; д - after treatment with  $0,44 \text{ W/cm}^3$ ; 1 - oxide films; 2 - formed channels; Pyh - pyrrhotite; Ccp - chalcopyrite

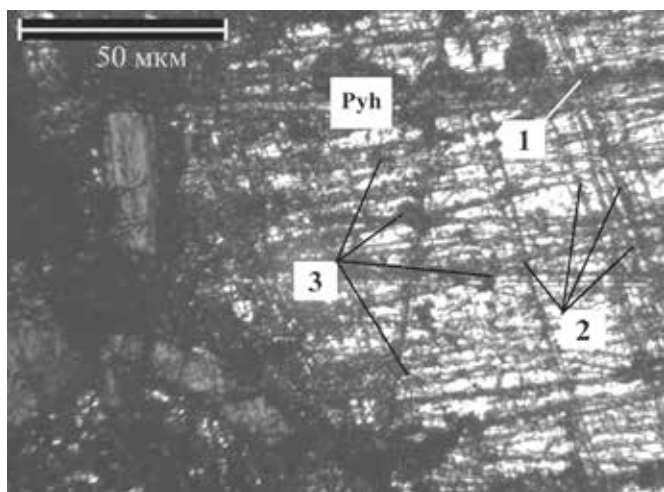


Рис. 3. Механические дефекты, образованные на поверхности пирротина после ультразвукового воздействия (1 Вт/см<sup>3</sup>, 30 мин.): 1 – трещина; 2 – канал; 3 – кратер /

Fig. 3. Mechanical defects formed on the surface of pyrrhotite after ultrasonic irradiation (1 W/cm<sup>3</sup>, 30 min): 1 – crack; 2 – channel; 3 – crater

### Заключение

1. Исследования изменений в морфологии окисленной в атмосферных условиях поверхности аншлифов сульфидной руды после ультразвукового воздействия подтвердили, что ультразвуковая обработка вызывает удаление оксидных пленок, значительно изменяет морфологию поверхности, вызывая повреждение поверхности, образование дефектов в виде каналов и кратеров.

2. Эксперимент показал, что ультразвуковая обработка объемной интенсивностью от 0,44 до 0,78 Вт/см<sup>3</sup> в течение 15 мин. поверхности аншлифа удаляет оксидные пленки с поверхности пирротина и халькопирита только частично. При объемной интенсивности от 0,78 Вт/см<sup>3</sup> и выше пирротин и халькопирит подвержены большим изменениям в морфологии.

3. Результаты исследований показывают, что ультразвуковая обработка рудных пульп может увеличить кинетику процесса бактериально-химического окисления, что позволит разработать экологические, рентабельные технологии переработки сульфидных руд.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Iodis V.A., Koydan I.A. Investigation of oxide films removal process from the ore pulp particle surface during its ultrasonic treatment. *Non-Ferrous Metals*. 2024; 1: 8-12. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.02>.
- Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Шалунов А.В. и др. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред. *Ползуновский вестник*. 2017; 4: 123-128.  
Golykh R.N., Khmlev V.N., Shalunov A.V., et al. Identification of optimal conditions for ultrasonic cavitation treatment of highly viscous and non-Newtonian liquid media. *Polzunov bulletin*. 2017; 4: 123-128. (In Russ.).
- Голых Р.Н., Минаков В.Д. Разработка исследовательского стенда для изучения влияния ударно-волнового давления как независимого фактора ультразвукового кавитационного воздействия. *Ползуновский вестник*. 2024; 1: 191-196. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023>.  
Golykh R.N., Minakov V.D. Development of a research rig for studying the influence of shock-wave pressure as an independent factor of ultrasonic cavitation action. *Polzunov bulletin*. 2024; 1: 191-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023>.
- Bao S., Chen B., Zhang Y., et al. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Application, mechanisms and prospects. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023; 98: 106525. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106525>.
- Гроо Е.А., Алгебраистова Н.К., Жижжаев А.М. и др. Исследование влияния ультразвуковой обработки для интенсификации процессов извлечения золота из труднообогатимого сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012; 2: 89-96.  
Groo E.A., Algebraistova N.K., Zhizhaev A.M., et al. Study of the influence of ultrasonic treatment for intensifying gold extraction processes from refractory raw materials. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012; 2: 89-96. (In Russ.).
- Lin Q., Sun L., Cao Y., et al. Effect of ultrasonic treatment on the surface hydrophobicity of pyrite: Properties and mechanism of ultrasonic products. *Minerals Engineering*. 2025; 233: 109661. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109661>.
- Лунин Б.С., Николаев А.Л. Изменение рельефа поверхности кварцевого стекла при ультразвуковой обработке. *Неорганические материалы*. 2023; 59 (3): 317-322. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23030090>.  
Lunin B.S., Nikolaev A.L. Changes in the surface relief of quartz glass during ultrasonic treatment. *Inorganic Materials*. 2023; 59 (3): 317-322. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002337X23030090>.
- Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. и др. Механизм влияния комбинированных энергетических воздействий на интенсификацию выщелачивания циркония и редкоземельных элементов из эвдиалитового концентрата. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017; 5: 105-112. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20170512>.  
Chanturia V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., et al. Mechanism of influence of combined energy impacts on intensification of leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate. *Physicotechnical Problems of Mineral Development*. 2017; 5: 105-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20170512>.
- Lu J., Wang N., Yuan Z., et al. The effects of ultrasonic wave on heterogeneous coagulation and flotation separation of pentlandite-serpentine. *Minerals Engineering*. 2022; 188: 107828. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107828>.
- Cao D., Xu X., Jiang S. Ultrasound-electrochemistry enhanced flotation and desulphurization for fine coal. *Separation and Purification Technology*. 2021; 258: 117968. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117968>.
- Pan W., Yi R., Liao Z., Yang L. Experimental study on microbial desulphurization of sulfide ores and self-heating simulation of ore heaps under ultrasonic and microwave. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 164: 435-448. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.033>.
- Lim M.S.W., Yang T.C.K., Yap Y.H., et al. Intensification and optimisation of nickel recovery from spent hydrogenation catalysts via ultrasound-augmented hydrometallurgy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021; 9: 105771. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105771>.
- Wang J., Faraji F., Ghahreman A. Effect of ultrasound on the oxidative copper leaching from chalcopyrite in acidic ferric sulfate media. *Minerals*. 2020; 10 (7): 633. <https://doi.org/10.3390/min10070633>.
- Трухин Ю.П., Иодис В.А., Хайнасова Т.С. СВЧ и УЗИ активация кинетики бактериально-химических процессов выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; 11 (19): 113-123. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_11\\_19\\_113](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_113).

- Trukhin Yu.P., Iodis V.A., Khainasova T.S. Microwave and ultrasound activation of the kinetics of bacterial-chemical processes of leaching cobalt-copper-nickel ores of the Shanuch deposit. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11 (19): 113-123. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_11\\_19\\_113](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_113).
15. Иодис В.А. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023; 12: 81-87. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.13>.
- Iodis V.A. Laboratory reactor for ultrasonic treatment of cobalt-copper-nickel ore pulp. *Mining Journal*. 2023; 12: 81-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.13>.
16. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Барсуков А.Р. и др. Ультразвуковой технологический аппарат с пятью рабочими инструментами различного диаметра для проведения научных исследований. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2022; 4 (44): 106-109. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.003>.
- Khmelev V.N., Barsukov R.V., Barsukov A.R., et al. Ultrasonic technological apparatus with five working tools of different diameters for scientific research. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2022; 4 (44): 106-109. (In Russ.). <https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.003>.
17. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. Екатеринбург, 2007: 720.
- Betechtin A.G. Course of mineralogy. Ekaterinburg, 2007: 720. (In Russ.).
18. Liao Y., Zhao G., Feng B., et al. Application of ultrasonic pre-treatment for flotation separation pyrrhotite from chlorite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023; 669 (3): 131507. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131507>.
19. Hassanzadeh A., Gholami H., Ozkan S.G., et al. Effect of power ultrasound on wettability and collectorless floatability of chalcopyrite, pyrite and quartz. *Minerals*. 2021; 11(1) (48): 1-16. <https://doi.org/10.3390/min11010048>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Артём Александрович Аврейцевич –**

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

**Валентин Алексеевич Иодис –**

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИИГТЦ ДВО РАН)», научный руководитель аспиранта, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация; [iodisva@mail.ru](mailto:iodisva@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

### Критерии авторства:

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

### Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.03.2026

Поступила после рецензирования: 24.05.2026

Принята к публикации: 30.05.2026

## ABOUT THE AUTHORS

**Artem A. Avreitsevich –**

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

**Valentin A. Iodis –**

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (RGC FEB RAS), postgraduate student's supervisor, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation; [iodisva@mail.ru](mailto:iodisva@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

### Contribution:

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

### Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

### Article info

Received: 12.03.2026

Revised: 24.05.2026

Accepted: 30.05.2026

# Алгоритм решения контактных задач с использованием технологий глубокого машинного обучения при переработке полезных ископаемых

Р. Д. Пряжевский<sup>1</sup>✉, В. А. Атрушкевич<sup>2</sup>, Е. Ю. Барменков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ [pryazhevsky@mgri.ru](mailto:pryazhevsky@mgri.ru)

**Резюме.** Разработан и представлен алгоритм решения контактных задач механики деформируемого твердого тела с использованием технологий глубокого машинного обучения. Метод основан на применении физически информированных нейронных сетей, что позволяет искать решения, непосредственно удовлетворяющие системам дифференциальных уравнений равновесия и граничным условиям. Ключевой особенностью предложенного подхода является сведение исходной краевой задачи с односторонними контактными ограничениями, выраженными в форме неравенств, к задаче безусловной оптимизации. Для этого построена специальная функция потерь, которая инкорпорирует условия непроникания и отсутствия адгезии в процедуру обучения нейронной сети. Алгоритм продемонстрирован на репрезентативных примерах контакта абсолютно твердого штампа с упругими основаниями, моделируемыми балками Бернулли – Эйлера и Тимошенко в одномерной постановке. Показано, что метод эффективно определяет как искомые поля перемещений и давлений, так и неизвестную заранее область контакта. Разработанный подход формирует вычислительную основу для создания быстрых суррогатных моделей, актуальных для моделирования и оптимизации процессов переработки минерального сырья, таких как дробление и измельчение, в контексте задач энергосбережения и кристаллосбережения.

**Ключевые слова:** полезные ископаемые, дробление, измельчение, физически информированные нейронные сети, балки, пластины, машинное обучение, математическая оптимизация, кристаллосбережение

**Для цитирования:** Пряжевский Р. Д., Атрушкевич В. А., Барменков Е. Ю. Алгоритм решения контактных задач с использованием технологий глубокого машинного обучения при переработке полезных ископаемых. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 21-26. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-21-26>.

## An algorithm for solving contact problems using deep machine learning technologies in mineral processing

R. D. Pryazhevsky<sup>1</sup>✉, V. A. Atrushkevich<sup>2</sup>, E. Yu. Barmenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ [pryazhevsky@mgri.ru](mailto:pryazhevsky@mgri.ru)

**Abstract.** This paper develops and presents an algorithm for solving contact problems in solid mechanics using deep machine learning technologies. The method is based on the application of physically informed neural networks, which enables searching for solutions that directly satisfy systems of equilibrium differential equations and boundary conditions. A key feature of the proposed approach is the reduction of the original boundary value problem with one-sided contact constraints expressed as inequalities to an unconstrained optimization problem. For this purpose, a special loss function is constructed that incorporates the non-penetration and non-adhesion conditions into the neural network training procedure. The algorithm is demonstrated using representative examples of contact between a perfectly rigid stamp and elastic foundations modeled by Bernoulli-Euler and Timoshenko beams in a one-dimen-

sional setting. It is shown that the method effectively determines both the sought-after displacement and pressure fields and the previously unknown contact region. The developed approach forms a computational basis for the creation of fast surrogate models relevant for modeling and optimizing mineral processing processes, such as crushing and grinding, in the context of energy conservation and crystal conservation.

**Keywords:** contact problems, physically informed neural networks, beams, plates, machine learning, mathematical optimization, crystal conservation, crushing

**For citation:** Pryazhevsky R.D., Atrushkevich V.A., Barmenkov E.Yu. An algorithm for solving contact problems using deep machine learning technologies in mineral processing. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 21-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-21-26>.

## Введение

Процессы переработки минерального сырья — дробление, измельчение, брикетирование, гранулирование — в своей основе являются совокупностью множества микро- и макроконтальных взаимодействий. Механическое разрушение куска породы между щеками дробилки, дробление и истирание материала шарами в мельнице, уплотнение концентрата под прессом — это классические контактные задачи механики деформируемого твердого тела. Их точное моделирование критически важно для оптимизации энергопотребления, прогнозирования износа оборудования, управления гранулометрическим составом продукта и проектирования новых, более эффективных аппаратов.

Особую актуальность подобные исследования приобретают в контексте концепции кристаллосбережения при дроблении и измельчении. Её цель — минимизировать переизмельчение ценных минералов и добиться максимального раскрытия сростков при минимальном повреждении кристаллической структуры полезных компонентов. Достижение этого требует глубокого понимания и точного управления контактными силами и напряжениями, возникающими в куске руды в момент разрушения.

Традиционные подходы к решению таких задач, включая метод конечных элементов (МКЭ), сталкиваются с фундаментальными сложностями: необходимостью отслеживания эволюции контактных поверхностей, обработкой условий одностороннего контакта (непроникания), высокими вычислительными затратами при моделировании множественных актов разрушения. Это делает многовариантные расчеты и оперативное прогнозирование в рамках технологических циклов крайне затруднительными.

Технологии глубокого машинного обучения, в частности, физически информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks, PINN), предлагают новый парадигмальный подход. Они позволяют искать решение, непосредственно удовлетворяющее системе дифференциальных уравнений и краевых условий, включая неравенства, в форме единой задачи оптимизации. Это открывает путь к созданию быстрых суррогатных моделей сложных контактных процессов, способных в перспективе прогнозировать не только факт разрушения, но и его характер (хрупкий, пластичный, по границам зерен), что напрямую связано с задачами кристаллосбережения.

В данной работе предлагается алгоритм решения статических контактных задач на основе методов глубокого обучения с физическим подкреплением. В качестве фундаментальной, но репрезентативной модели, рассматривается задача о контакте абсолютно твердого штампа (аналог рабочего орга-

на дробилки, пресса или единичного дробящего тела) с упругой балкой (модель упругого основания, слоя материала или деформируемого куска руды).

Направление исследований — демонстрация принципиальной возможности точного учета условий одностороннего контакта с помощью специально сконструированной функции потерь нейронной сети. Разработанный метод будет являться основой для последующего масштабирования на решение практических задач переработки: моделирования напряженного состояния в камере дробления, анализа контактных давлений в валковом прессе, а также для фундаментального изучения распределения напряжений внутри куска с целью оптимизации режимов разрушения в русле кристаллосберегающих технологий.

**Цель исследований:** разработка алгоритма на основе физически информированных нейронных сетей (PINN) для моделирования контактных взаимодействий в процессах переработки полезных ископаемых (дробление, измельчение, брикетирование) с целью оптимизации энергозатрат и реализации принципов кристаллосбережения

## Задачи исследований

Рассматриваются контактные задачи для тонких тел (балки, пластины), к которым будем применять общий термин «основание», и абсолютно твердых штампов [1].

Задачи рассматриваются в одномерной постановке. Все искомые и заданные функции зависят от одной пространственной координаты.

В качестве оснований рассматриваются следующие математические модели [2].

1. Балка Бернулли-Эйлера (пластина Кирхгофа в плоской постановке).

Уравнение равновесия:

$$-\frac{d^2}{dx^2} \left( EI_z \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + p = 0, x \in [0, l], \quad (1)$$

где  $w$  — прогиб балки;

$p$  — нормальное давление;

$E$  — модуль Юнга;

$I_z$  — момент инерции поперечного сечения;

$l$  — длина балки.

Как модуль Юнга, так и момент инерции могут зависеть от координаты  $x$ :  $E = E(x)$ ,  $I_z = I_z(x)$ .

Граничные условия соответствуют условиям шарнирного опирания:

$$w|_{x=0} = \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{x=0} = w|_{x=l} = \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{x=l} = 0. \quad (2)$$

2. Балка Тимошенко (пластина Тимошенко в плоской постановке):

$$k^2 \frac{d}{dx} \left( GF \frac{dw}{dx} \right) - k^2 \frac{d(GF\chi)}{dx} + p = 0, \quad (3)$$

$$GFk^2 \frac{dw}{dx} + \frac{d}{dx} \left( EI_z \frac{d\chi}{dx} \right) - GFk^2 \chi = 0, \chi \in [0, l],$$

где  $\chi(x)$  – изменение угла поворота нормали к поперечному сечению за счёт сдвиговых деформаций,

$G$  – модуль сдвига,

$F$  – площадь поперечного сечения.

Граничные условия соответствуют условиям шарнирного опирания:

$$w|_{x=0} = \frac{d\chi}{dx}|_{x=0} = w|_{x=l} = \frac{d\chi}{dx}|_{x=l} = 0. \quad (4)$$

Полагается, что абсолютно твёрдый штамп имеет заданную форму и является либо прямоугольным, либо строго гладким и выпуклым в плане, граница которого определяется заданной функцией  $f(x)$ . В первом варианте приходим к контактному задаче с известной областью контакта, во втором случае область контакта  $\Omega$  заранее не известна и должна быть найдена в процессе решения контактной задачи [3].

Полагаем, что величина смещения центра масс штампа  $h$  задана (рис. 1).

Контакт происходит без трения.

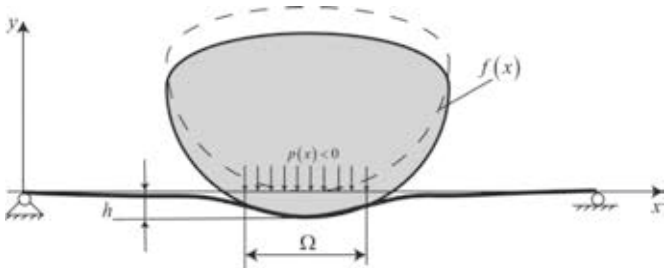


Рис. 1. Постановка задачи:  $f(x)$  – функция, описывающая форму штампа;  $p(x)$  – функция давления в области контакта;  $\Omega$  – граница области контакта;  $h$  – величина смещения центра масс /

Fig. 1. Problem statement:  $f(x)$  is a function describing the shape of the stamp;  $p(x)$  is a function of pressure in the contact area;  $\Omega$  is the boundary of the contact area;  $h$  is the magnitude of the displacement of the center of mass

В зоне контакта нормальные перемещения основания совпадают с перемещениями границы штампа. Полагается, что давление в зоне контакта отрицательное, а вне зоны контакта равно нулю (условия нормального контакта без трения):

$$w|_{x \in \Omega} = f(x) - h, \quad p|_{x \in \Omega} < 0, \quad p|_{x \notin \Omega} = 0. \quad (5)$$

Одной из сложностей при решении  $\Omega$  контактных задач является определение области контакта, которая в данном случае является отрезком, принадлежащем оси  $Ox$ :  $\Omega = \{x \in [a, b]\}$ .

Введём функцию  $g(x) = f(x) - h - w(x)$ , которая описывает зазор между штампом и основанием. Тогда условия контакта можно записать в следующей форме

$$g(x) \geq 0, \quad p(x) \leq 0, \quad p(x)g(x) = 0. \quad (6)$$

Первое неравенство в гарантирует непроникание контактирующих тел, второе обеспечивает отсутствие адгезионных сил (условие одностороннего нормального контакта). Третье равенство в говорит о том факте, что при ненулевом контактом давлении зазор между взаимодействующими тела-

ми должен быть равен нулю, а при ненулевом зазоре обязано быть равным нулю контактное давление [4]. Заметим также, что это условие не исключает случая одновременного равенства нулю зазора и контактного давления, что возможно в некоторых подобластях, принадлежащих области контакта.

Запись условий контакта в форме удобна для вычислительной реализации, поскольку не включает явно саму область контакта.

### Метод решения

Для решения поставленных задач предлагается метод, базирующийся на новой многообещающей технологии построения решений различных научных задач с применением глубоких нейронных сетей с физико-математическим подкреплением. Суть данного метода заключается в построении задачи математической оптимизации, эквивалентной исходной задаче. При этом искомые функции аппроксимируются посредством глубоких нейронных сетей.

Рассмотрим алгоритм решения контактных задач на примере задачи для балки Бернулли-Эйлера и абсолютно жесткого штампа, ограниченного гладкой кривой  $f(x)$ .

1. Функциям прогиба  $w(x)$ , давления  $p(x)$  и зазора  $g(x)$  ставим в соответствие их сетевые аппроксимации с помощью нейронной сети (рис. 2).

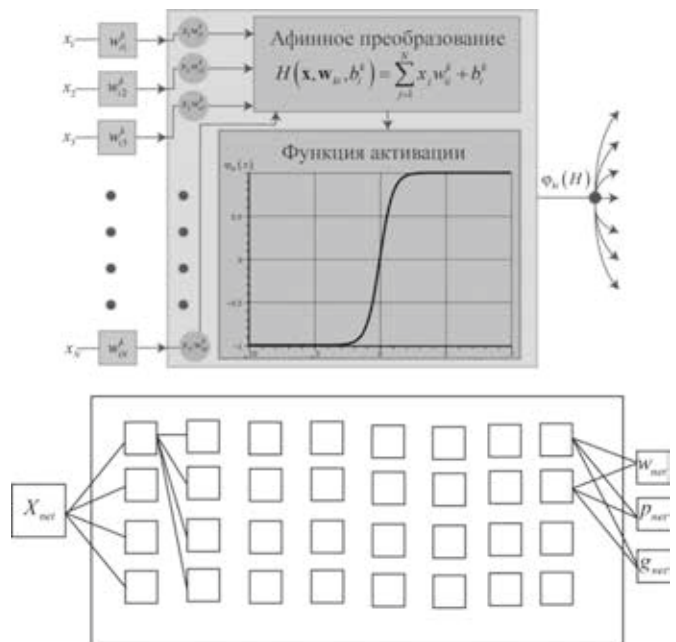


Рис. 2. Математический нейрон:  $w_{ki} = (w_{ij}^k)$ ,  $j = \overline{1, N_{ki}}$  – вектор весов входов нейрона;  $x = (x_j)$  – вектор на входе в нейрон;  $H$  – аффинное преобразование вектора входного сигнала;  $\varphi_k(H)$  – функции активации аффинного преобразования и нелинейное преобразование /

Fig. 2. Mathematical neuron:  $w_{ki} = (w_{ij}^k)$ ,  $j = \overline{1, N_{ki}}$  is the vector of neuron input weights;  $x$  is the input vector to the neuron;  $H$  is the affine transformation of the input signal vector;  $\varphi_k(H)$  are the activation functions of the affine transformation and the nonlinear transformation

Сама же нейронная сеть представляет собой сложную функцию от входной переменной  $x$ , которая содержит в качестве параметров веса  $w_{ij}^k$  и сдвиги  $b_i^k$  в нейронах.

$$\begin{bmatrix} w(x) \\ p(x) \\ g(x) \end{bmatrix} \approx U_{net}(x; W, B) = \begin{bmatrix} w_{net}(x) \\ p_{net}(x) \\ g_{net}(x) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $U_{net}$  – нейросетевая аппроксимация искоемых функций;

$W = (w_{ij}^k)$  – массив весов нейронных связей ( $k$  – номер слоя,  $i = 1, M_k$  – номер нейрона в  $k$ -том слое,  $j = 1, N_{ki}$  – номер входа в  $i$ -тый нейрон);

$B = b_i^k$  – матрица сдвигов в нейронах.

На выходе нейронной сети формируется функции  $w_{net}(x; W, B)$ ,  $p_{net}(x; W, B)$ , и  $g_{net}(x; W, B)$ . Как видно, этот подход позволяет определить перемещения и контактное давление за один процесс обучения (оптимизации) нейронной сети.

2. В качестве входных данных в нейронную сеть используем множество дискретных точек (точек коллокации)  $X_{net}$  [5]. Эти точки располагаются на интервале изменения переменной  $x$  случайным образом, подчиняясь закону равномерного распределения:

$$X_{net} = \{x_i \in (0, l), i = 1, 2, \dots, N\}. \quad (8)$$

3. Строится функция потерь, которая представляет собой сумму среднеквадратических отклонений невязок уравнения и условий контакта на множестве точек коллокации, а также невязки граничных условий в точках закрепления

$$L(W, B) = \left\| -\frac{d^2}{dx^2} \left( EI_z \frac{dw_{net}}{dx^2} \right) + p_{net} \right\|_{X_{net}} + w_{net}|_{x=0} + w_{net}|_{x=l} + \left\| \frac{d^2 w_{net}}{dx^2} \right\|_{x=0} + \left\| \frac{d^2 w_{net}}{dx^2} \right\|_{x=l} + \left\| \frac{1}{2} [1 - \text{sign}(g_{net})] g_{net} \right\|_{X_{net}} + \left\| \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(p_{net})] p_{net} \right\|_{X_{net}} + \|g_{net} p_{net}\|_{X_{net}}, \quad (9)$$

где  $\text{sign}(g)$  – знаковая функция;

$$\|w_{net}\|_{\Omega_{net}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_{net}^2(x_n; W, B).$$

На рис. 3 приведена функция активации.

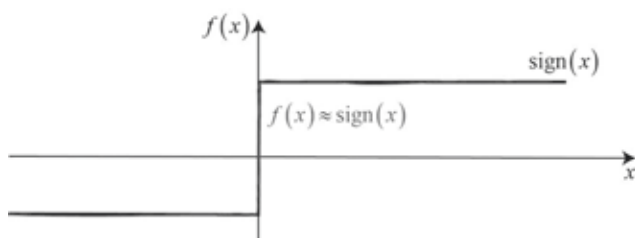


Рис. 3. Функция активации (функция  $\text{sing}(x)$  – простой выключатель); кривая  $f(x)$  – функция активации /

Fig. 3. The function of activation (function  $\text{sing}(x)$  is a simple switch); curve  $f(x)$  is the activation function

Функция потерь в форме учитывает невязки всех уравнений и соотношений, в том числе, невязки неравенств в .

4. Метод обучения нейронной сети.

Целью метода обучения нейронной сети является нахождение глобального минимума функции потерь на многомерном пространстве весов  $W$  и сдвигов  $B$ . Для этого можно использовать, например, известный и хорошо зарекомендовавший себя метод адаптивной оценки моментов (усовершенствованный метод градиентного спуска) и построенный на его основе алгоритм «adam» [6].

Аналогично строится функция потерь в контактной задаче с моделью основания в виде балки Тимошенко . В этом случае используется нейросетевая аппроксимация функций

$$\begin{bmatrix} w(x) \\ p(x) \\ \chi(x) \end{bmatrix} \approx U_{net}(x; W, B) \rightarrow \begin{bmatrix} w_{net}(x; W, B) \\ p_{net}(x; W, B) \\ \chi_{net}(x; W, B) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

С использованием , функция потерь в этом случае примет вид:

$$L(W, B) = \left\| k^2 \frac{d}{dx} \left( GF \frac{dw_{net}}{dx} \right) - k^2 \frac{d(GF \chi_{net})}{dx} + p_{net} \right\|_{X_{net}} + \left\| GF k^2 \frac{dw_{net}}{dx} + \frac{d}{dx} \left( EI_z \frac{d\chi_{net}}{dx} \right) - GF k^2 \chi_{net} \right\|_{X_{net}} + w_{net}|_{x=0} + w_{net}|_{x=l} + \chi_{net}|_{x=0} + \chi_{net}|_{x=l} + \left\| \frac{1}{2} [1 - \text{sign}(g)] g \right\|_{X_{net}} + \left\| \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(p_{net})] p_{net} \right\|_{X_{net}} + \|gp_{net}\|_{X_{net}}. \quad (11)$$

### Заключение

1. В результате проведённого исследования на основе технологий глубокого машинного обучения с физическим подкреплением был разработан и представлен алгоритм решения статических контактных задач для упругих оснований (модели балок Бернулли-Эйлера и Тимошенко) и абсолютно твёрдых штампов. Ключевой особенностью предложенного подхода является сведение исходной краевой задачи с неравенствами к задаче безусловной оптимизации. Для этого была построена специализированная функция потерь, которая в явном виде инкорпорирует условия одностороннего контакта (непроникание и отсутствие адгезии) в процедуру обучения нейронной сети. Использованный метод адаптивной оценки моментов (Adam) позволил эффективно находить параметры нейронной сети, минимизирующие эту функцию, что эквивалентно нахождению приближённого решения системы дифференциальных уравнений, граничных и контактных условий.

2. Представленный алгоритм, несмотря на рассмотрение модельных одномерных задач, формирует фундаментальную вычислительную основу для решения широкого круга прикладных проблем в обогащении полезных ископаемых.

**Моделирование процессов дробления и измельчения:** алгоритм может быть обобщён для моделирования контакта между дробящими телами (щеками дробилки, шарами мельницы) и куском руды, представленным в виде упругопластического или хрупкого тела сложной геометрии. Это открывает путь к симуляции разрушения с прогнозом гранулометрического состава продукта, что является центральной задачей для оптимизации энергозатрат. Возможность алгоритма определять неизвестную область контакта и распределение давления критически важна для оценки локальных пиковых напряжений, инициирующих трещину.

**Инструмент для кристаллосберегающих технологий:** точное расчётное определение полей напряжений внутри модельного куска (наподобие рассмотренной балки) позволяет изучать сценарии разрушения. Перспективным направлением является адаптация алгоритма для прогнозирования распространения трещин именно по границам минеральных зёрен (межкристаллитное разрушение), а не через них. Такой прогноз позволит целенаправленно выбирать режимы нагружения (скорость, силу, тип контакта) для максимального раскрытия сростков при минимальном переизмельчении ценного компонента.

Анализ износа и проектирование оборудования: решение контактных задач для пар «рабочий орган – материал» позволяет оценивать контактные давления, являющиеся главной причиной абразивного износа футеровок, дробящих плит, валков. Алгоритм может быть интегрирован в цикл цифрового проектирования для оптимизации геометрии рабочих органов с целью снижения удельных давлений и увеличения их ресурса.

3. На основе технологий глубокого машинного обучения с физическим подкреплением построен алгоритм решения статических контактных задач для балок и абсолютно жестких штампов. Исходная постановка задач сведена к задаче математической оптимизации. Её целью является поиск глобального минимума специально построенных функций потерь, учитывающих неравенства, входящий в формулировки условий контакта. Предложенный подход может быть использован для решения широкого класса контактных задач механики деформируемого твёрдого тела. Представленный

алгоритм решения может быть обобщен с целью решения нестационарных контактных задач.

### Выводы

1. Разработан алгоритм на основе физически информированных нейронных сетей, позволяющий точно решать статические контактные задачи с односторонними условиями за счёт специальной функции потерь, учитывающей неизвестную область контакта.

2. Апробация метода на моделях балок подтвердила его результативность для определения контактных давлений и зоны взаимодействия, что актуально для моделирования процессов дробления и измельчения.

3. Созданный подход формирует вычислительную основу для построения суррогатных моделей оборудования и оптимизации режимов переработки минерального сырья в контексте кристаллосбережения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Kingma D.P., Adam J.Ba. A Method for Stochastic Optimization. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>.
- Mirjalili V. Python Machine Learning. Third Edition / Sebastian Raschka. Packt, 2019: 770 с.
- Richthofer S., Wiskott L. Predictable feature analysis. *2015 IEEE 14th international conference on machine learning and applications (ICMLA)*. IEEE, 2015: 190-196.
- Raparthi M., Dodda B. Predictive Maintenance in IoT Devices Using Time Series Analysis and Deep Learning. *Journal of Ballistics*. 2022; 35: 01-10. <https://doi.org/10.52783/dxjb.v35.113>.
- Лакшманан В., Робинсон С., Мунн М. Машинное обучение. Паттерны проектирования. Санкт-Петербург, 2022: 448. Laksmanan V., Robinson S., Munn M. Machine Learning. Design Patterns: Trans. from English. St. Petersburg, 2022: 448. (In Russ.).
- Ensafi Y., Behmanesh A., Ghaemi R., et al. Time-series forecasting of seasonal items sales using machine learning - A comparative analysis. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2022; 2 (1): 100058. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2022.100058>.
- Xue-heng Qiu, Le Zhang, Ye Ren et al. Ensemble deep learning for regression and time series forecasting. *2014 IEEE symposium on computational intelligence in ensemble learning (CIEL)*. IEEE; 2014: 1-6. <https://doi.org/10.1109/CIEL.2014.7015739>.
- Goerg Georg. Forecastable component analysis. *International conference on machine learning*. PMLR. 2013: 64-72.
- Вероятностное машинное обучение: введение. Москва, 2022: 940. Probabilistic machine learning: an introduction. Moscow, 2022: 940.
- Benidis K., Bohlke-Schneider M., Flunkert V., et al. Probabilistic and Neural Time Series Modeling in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2020; 21 (116): 1-6.
- Ciaburro G., Iannace G. Machine learning-based algorithms to knowledge extraction from time series data: A review. *Data*. 2021; 6 (6): 55. <https://doi.org/10.3390/data6060055>.
- Daw A., Bu J., Wang S., et al. Rethinking the importance of sampling in physics-informed neural networks. *arXiv preprint*, 2022. <https://doi.org/arXiv:2207.02338>.
- Frank M., Drikakis D., Charissis V. Machine-Learning Methods for Computational Science and Engineering. *Computation*. 2020; 8: 1-35. <https://doi.org/10.3390/computation8010015>.
- Maier H.R., Razavi S., Kapelan Z., et al. Introductory overview: Optimization using evolutionary algorithms and other metaheuristics. *Environmental Modelling and Software*. 2019; 114: 1-44. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.018>.
- Vadyala S.R., Betgeri S.N., Matthews J.C., et al. A review of physics-machine learning in civil engineering. *Results in Engineering*. 2022: 1-38. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.04600>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Роман Дмитриевич Пряжевский –**

старший преподаватель кафедры высшей математики и физики, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва, Российская Федерация

### **Виктор Аркадьевич Атрушкевич –**

д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела моделирования геотехнических систем, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

### **Евгений Юрьевич Барменков –**

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой горно-технологических систем и энергетических комплексов имени Н. В. Тихонова ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва, 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: 18.02.2026

Поступила после рецензирования: 06.05.2026

Принята к публикации: 03.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

### **Roman D. Pryazhevsky –**

Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics and Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting”, Moscow, Russian Federation

### **Victor A. Atrushkevich –**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

### **Evgeny Yu. Barmenkov –**

Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of the Department of Mining and Technological Systems and Energy Complexes named after N.V. Tikhonov, Sergo Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting”, Moscow, Russian Federation

### **Contribution:**

The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

### **Conflict of interest:**

The authors declare no conflict of interest.

### **Article info**

Received: 18.02.2026

Revised: 06.05.2026

Accepted: 03.06.2026

## Бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотного раствора при подземном выщелачивании урана

Р. А. Юсубалиев<sup>1</sup>, Е. С. Орынгожин<sup>2,3</sup>, М. К. Джексенов<sup>4</sup>,  
Е. Е. Орынгожа<sup>5✉</sup>, Н. А. Милетенко<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Институт горного дела имени Д. А. Кунаева, Алматы, Республика Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>4</sup>Атырауский университет имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика Казахстан

<sup>5</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>6</sup>ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация

✉ e24.01@mail.ru

**Резюме.** Развитие уранодобывающей промышленности Казахстана связано с решением крупных научно-практических задач. Современное уранодобывающее производство характеризуется высокой динамичностью, возникновением в ряде случаев радиационно опасных ситуаций, требующих принятия быстрых и эффективных решений по их устранению. Каждое из месторождений имеет специфические особенности, что обуславливает необходимость выполнения определенных объемов научных исследований не только в процессе разработки новых, но и при применении известных технических решений. Поскольку на полигонах подземного выщелачивания в Казахстане применяется технологическая схема, предусматривающая использование оборотных растворов, содержащих ряд петрогенных элементов Na, Ca, Mg, Al, Fe и, кроме того, ионы Cl<sup>-</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, их влияние на изменение окислительно-восстановительного потенциала при взаимодействии с карбонатами минерализованных сернокислых растворов нельзя не учитывать. Взаимодействие сернокислых растворов с карбонатами сопровождается значительным повышением pH. При этом помимо простых ионов металлов и их сульфатных комплексов в растворах появляются известные гидрокомплексы, а также бикарбонатные и карбонатные комплексы. В статье приводится бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотных растворов скважинного выщелачивания урана с использованием ультразвука и результаты лабораторных экспериментов, подтверждающих высокую эффективность разработанного способа.

**Ключевые слова:** уран, подземное выщелачивание, окислительно-восстановительный потенциал, способ, раствор, эффективность

**Для цитирования:** Юсубалиев Р.А., Орынгожин Е.С., Джексенов М.К., Орынгожа Е.Е., Милетенко Н.А. Бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотного раствора при подземном выщелачивании урана. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 27-32. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-27-32>.

# An acid-free method for increasing the oxidation-reduction potential of uranium in-situ leaching recycle solution

R. A. Yusubaliev<sup>1</sup>, Ye. S. Oryngozhin<sup>2,3</sup>, M. K. Djexenov<sup>4</sup>,  
Ye. Ye. Oryngozha<sup>5</sup>✉, N. A. Miletenko<sup>6</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of mining after D.A. Kunaeva, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup>Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>4</sup>Atyrau university named after H. Dosmukhamedova, Atyrau, Republic of Kazakhstan

<sup>5</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>6</sup>Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ e24.01@mail.ru

**Abstract.** The development of Kazakhstan's uranium mining industry is linked to addressing major scientific and practical challenges. Modern uranium mining is characterized by high dynamism and the occasional occurrence of radiation-hazardous situations that require rapid and effective solutions. Each deposit has its own specific characteristics, necessitating a certain amount of scientific research not only during the development of new deposits but also during the application of existing technical solutions. Since the process flowsheet used at the in-situ leaching sites in Kazakhstan involves the use of recirculating solutions containing several petrogenic elements (Na, K, Ca, Mg, Al, Fe), as well as  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$  ions, their impact on the change in ORP during interaction with carbonates in mineralized sulfuric acid solutions cannot be ignored. The interaction of sulfuric acid solutions with carbonates is accompanied by a significant increase in pH. In addition to simple metal ions and their sulfate complexes, well-known hydrocomplexes, as well as bicarbonate and carbonate complexes, appear in the solutions. This article presents an acid-free method for increasing the redox potential of uranium borehole leaching recycle solutions using ultrasound and describes the results of laboratory experiments confirming the high efficiency of the developed method.

**Keywords:** uranium, underground leaching, oxidation-reduction potential, method, solution, efficiency

**For citation:** Yusubaliev R.A., Oryngozhin Ye.S., Djexenov M.K., Oryngozha Ye.Ye., Miletenko N.A. An acid-free method for increasing the oxidation-reduction potential of uranium in-situ leaching recycle solution. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 27-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-27-32>.

## Введение

Авторами статьи разработан бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотных растворов подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) урана с использованием ультразвука в сложных горно-гидрогеологических условиях, способы интенсификации технологических процессов, принципиально новые методы дифференцированного извлечения урана, а также создания новой технологии улучшения работы в области экологической и производственной безопасности.

Основные преимущества этого способа подземного скважинного выщелачивания урана по сравнению с традиционными горными способами разработки месторождений [1]:

- возможность вовлечения в эксплуатацию бедных и забалансовых руд месторождений со сложными геолого-гидрогеологическими условиями залегания, но имеющими крупные запасы урана;
- сокращение капитальных вложений и сроков ввода месторождений в эксплуатацию;
- улучшение условий труда, сокращение численности горнорабочих, производительность труда повышается в 2,5 раза;
- уменьшение отрицательного воздействия уранодобычи на окружающую среду.

Каждое из месторождений имеет специфические осо-

бенности, что обуславливает необходимость выполнения определенных объемов научных исследований не только в процессе разработки новых, но и при применении известных технических решений. Поскольку на полигонах подземного выщелачивания в Казахстане применяемая технологическая схема предусматривает использование оборотных растворов, содержащих ряд петрогенных элементов Na, K, Ca, Mg, Al, Fe и, кроме того, ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{NO}_3^-$ , их влияние на изменение при взаимодействии с карбонатами минерализованных сернокислых растворов нельзя не учитывать. Проблеме повышения эффективности добычи урана в Казахстане уделяется значительное внимание.

**Цель исследования:** разработка бескислотного способа повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотных растворов подземного скважинного выщелачивания урана с использованием ультразвука в сложных горно-гидрогеологических условиях и способов интенсификации технологических процессов.

## Методика исследований

На полигонах подземного выщелачивания (ПВ) уран добывается подземным скважинным выщелачиванием с использованием водных растворов серной кислоты. Теоретически расход серной кислоты на извлечение 1 кг урана составляет 0,8 кг для четырехвалентных и 0,4 кг – для ше-

свивалентных форм урана. Однако ввиду взаимодействия растворов с элементами, входящими в состав породообразующих минералов, на практике удельный расход кислоты составляет десятки и даже первые сотни килограммов на килограмм урана.

Анализ продуктивных растворов сернокислотного выщелачивания урана по ряду объектов ПВ показал, что в растворе вместе с ураном попадает целый ряд примесей (табл. 1) [2].

Таблица 1 / Table 1

Концентрация компонентов рудовмещающих пород в растворах выщелачивания /  
Concentration of ore-bearing rock components in leaching solutions

| Реакция растворения                                    | Извлечение в раствор, % | Концентрация компонентов в растворе, г-моль/л      |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| $CaSiO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + (H_2SiO_3)$    | 1                       | $(1,65 \cdot 10^{-3} - 8,3 \cdot 10^{-3}) SiO_2$   |
| $Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$  | 3–5                     | $(9,8 \cdot 10^{-3} - 11,7 \cdot 10^{-2}) Al_2O_3$ |
| $Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$  | 5–8                     | $(1,88 \cdot 10^{-3} - 4,4 \cdot 10^{-2}) Fe_2O_3$ |
| $FeO + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2O$              | 40–50                   | $(6,9 \cdot 10^{-3} - 4,2 \cdot 10^{-2}) FeO$      |
| $FeCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2O + CO_2$    | 80–90                   | $(2,75 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-3}) FeO$     |
| $CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2$    | 80–90                   | $(1,51 \cdot 10^{-2} - 2,02 \cdot 10^{-2}) CaO$    |
| $MgCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow MgSO_4 + H_2O + CO_2$    | 80–90                   | $(5,9 \cdot 10^{-3} - 3,57 \cdot 10^{-2}) MgO$     |
| $MoO_3 + H_2O \xrightarrow{H_2SO_4} H_2MoO_4$          | 60–90                   | $(5,2 \cdot 10^{-3} - 3,12 \cdot 10^{-2}) Mo$      |
| $CuO + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + H_2O$              | 30–70                   | $(1,25 \cdot 10^{-3} - 1,25 \cdot 10^{-2}) CuO$    |
| $Ca(PO_3)_4 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3CaSO_4 + 3H_2PO_4$ | 70–90                   | $(0,71 \cdot 10^{-3} - 1,0 \cdot 10^{-2}) P_2O_5$  |

Основными кислотоёмкими минералами являются карбонаты: кальций, доломит, магнезит и некоторые виды глинистых минералов. В значительной степени продуктивные растворы ПВ обогащаются ионами железа и алюминия. Обогащение растворов примесями приводит к понижению кислотности рабочих растворов, возникновению кальмомации пластов и снижению сорбционной емкости ионообменных смол по урану.

Известно, что достаточно высокая степень окисления четырехвалентного урана  $UO_2$ , присутствующего в рудах, достигается при окислительно-восстановительном потенциале (ОВП) 500–600 мВ [3]. Поддержание такого потенциала на практике достигается за счет повышенного расхода серной кислоты для окисления двухвалентного железа в трехвалентное, обеспечивающего поддержание ОВП на требуемом уровне. При этом в Казахстане на полигонах ПВ расходуются десятки и даже сотни тысяч тонн серной кислоты.

С целью существенного сокращения расхода серной кислоты для добычи урана Национальной атомной компанией «Казатомпром» при участии авторов данной статьи разработан бескислотный способ повышения ОВП оборотного раствора ПВ (патент РК № 34456). Сущность способа заключается в ультразвуковом повышении ОВП раствора выщелачивания.

В процессе разработки способа было установлено, что ОВП раствора ПВ зависит, главным образом, от соотношения концентрации ионов  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  в растворе и при соотношении  $Fe^{2+}/Fe^{3+} \leq 1$  достигается хорошая растворимость четырехвалентного урана. Установлено, что при  $Eh < +300$  мВ все железо находится в двухвалентной форме  $Fe(II)$ ,

при  $Eh = 450–500$  мВ около 50 % железа окисляется до трехвалентного состояния  $Fe(III)$ , и при  $Eh$  более 500–550 мВ все железо практически переходит в трехвалентную форму. Установлено также, что наращивание концентрации  $H_2SO_4$  в растворе ПВ от 0,5 до 10N реальный потенциал системы меняется весьма незначительно, а расход кислоты существенно возрастает [4–7].

На ОВП раствора влияют и другие присутствующие в нем катионы переменной валентности, однако их роль в установлении потенциала по сравнению с ионами железа незначительна. Концентрация ионов  $Fe^{2+}$  в оборотных растворах колеблется в широких пределах и может достигать значительных величин, при этом  $Eh$  раствора снижается до 150 мВ.

В связи с тем что  $Fe^{3+}$  являются непосредственными окислителями  $U(IV)$ :  $UO_{2(m)} + 2Fe_{(e)}^{3+} \rightarrow UO_{2(e)}^{2+} + 2Fe_{(e)}^{2+}$ , повышение концентрации трехвалентного железа в растворах ПВ является актуальной задачей.

К бескислотному направлению повышения ОВП растворов ПВ, с переводом  $Fe(II)$  в  $Fe(III)$ , относится ультразвуковая обработка оборотных растворов.

С целью определения параметров ультразвуковой обработки оборотных растворов ПВ был проведен цикл лабораторных экспериментов. Взятый на исследования раствор был протестирован на валовую концентрацию элементов (моль/л):  $K - 1,7 \cdot 10^{-3}$ ,  $Na - 3,45 \cdot 10^{-2}$ ,  $Ca - 13 \cdot 10^{-2}$ ,  $Mg - 2,61 \cdot 10^{-2}$ ,  $Al - 6,49 \cdot 10^{-3}$ ,  $Fe(II) - 3,98 \cdot 10^{-3}$ ,  $Fe(III) - 4,21 \cdot 10^{-4}$ ,  $U - 1,8 \cdot 10^{-3}$  г/л,  $S_{сульф} - 7,9 \cdot 10^{-2}$ ,  $Cl - 2,35 \cdot 10^{-2}$ ,  $NO_3^- - 7,13 \cdot 10^{-3}$ ,  $pH = 2,3$ .

Для лабораторных экспериментов использовалась установка с погружным магнитострикционным излучателем. Диаметр торца излучателя составлял 32 мм. Питание преобразователя осуществлялось от ультразвукового генератора УЗГ-10-22. Интенсивность ультразвука поддерживалась постоянной ( $2,5 \pm 0,1$  Вт/см<sup>2</sup>) для всех серий опытов. Частота ультразвука изменялась от 10 до 30 кГц. Диапазон ультразвуковой обработки оборотного раствора ПВ изменялся от 5 до 20 мин. На каждом режиме наложения ультразвука контролировалось изменение состава раствора по  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Eh$  и  $pH$ . Для определения ионов железа использовался стандартный метод титриметрического анализа, замеры  $Eh$  осуществлялись потенциометрическим методом с использованием платинового электрода, применялся также иономер И-115 [3, 8–10].

Результаты экспериментов приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 / Table 2

Результаты определения  $Fe^{3+}$  /  
Results of  $Fe^{3+}$  determination

| Режим                    | Время ультразвуковой обработки, мин. |                      |                      |                      |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                          | 5                                    | 10                   | 15                   | 20                   |
| Время $Fe^{3+}$ , моль/г |                                      |                      |                      |                      |
| $R_1$                    | $6,16 \cdot 10^{-4}$                 | $1,16 \cdot 10^{-3}$ | $1,87 \cdot 10^{-3}$ | $2,04 \cdot 10^{-3}$ |
|                          | $6,29 \cdot 10^{-4}$                 | $1,17 \cdot 10^{-3}$ | $1,79 \cdot 10^{-3}$ | $2,15 \cdot 10^{-3}$ |
|                          | $6,18 \cdot 10^{-4}$                 | $1,12 \cdot 10^{-3}$ | $1,80 \cdot 10^{-3}$ | $2,17 \cdot 10^{-3}$ |
| Среднее                  | $6,21 \cdot 10^{-4}$                 | $1,15 \cdot 10^{-3}$ | $1,82 \cdot 10^{-3}$ | $2,12 \cdot 10^{-3}$ |
| $R_2$                    | $1,43 \cdot 10^{-3}$                 | $2,85 \cdot 10^{-3}$ | $4,08 \cdot 10^{-3}$ | $4,67 \cdot 10^{-3}$ |
|                          | $1,51 \cdot 10^{-3}$                 | $2,76 \cdot 10^{-3}$ | $4,29 \cdot 10^{-3}$ | $4,70 \cdot 10^{-3}$ |
|                          | $1,41 \cdot 10^{-3}$                 | $2,88 \cdot 10^{-3}$ | $4,19 \cdot 10^{-3}$ | $4,61 \cdot 10^{-3}$ |
| Среднее                  | $1,45 \cdot 10^{-3}$                 | $2,83 \cdot 10^{-3}$ | $4,22 \cdot 10^{-3}$ | $4,66 \cdot 10^{-3}$ |

Продолжение таблицы / Continuation of the table

| Режим   | Время ультразвуковой обработки, мин. |                      |                      |                      |
|---------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         | 5                                    | 10                   | 15                   | 20                   |
|         | Время $Fe^{3+}$ , моль/г             |                      |                      |                      |
| $R_3$   | $2,78 \cdot 10^{-3}$                 | $5,67 \cdot 10^{-3}$ | $6,68 \cdot 10^{-3}$ | $7,04 \cdot 10^{-3}$ |
|         | $2,71 \cdot 10^{-3}$                 | $5,71 \cdot 10^{-3}$ | $6,62 \cdot 10^{-3}$ | $7,12 \cdot 10^{-3}$ |
|         | $2,76 \cdot 10^{-3}$                 | $5,75 \cdot 10^{-3}$ | $6,68 \cdot 10^{-3}$ | $6,99 \cdot 10^{-3}$ |
| Среднее | $2,75 \cdot 10^{-3}$                 | $5,71 \cdot 10^{-3}$ | $6,66 \cdot 10^{-3}$ | $7,05 \cdot 10^{-3}$ |
| $R_4$   | $4,99 \cdot 10^{-3}$                 | $8,73 \cdot 10^{-3}$ | $9,44 \cdot 10^{-3}$ | $9,75 \cdot 10^{-3}$ |
|         | $4,31 \cdot 10^{-3}$                 | $8,83 \cdot 10^{-3}$ | $9,44 \cdot 10^{-3}$ | $9,72 \cdot 10^{-3}$ |
|         | $4,40 \cdot 10^{-3}$                 | $8,87 \cdot 10^{-3}$ | $9,47 \cdot 10^{-3}$ | $9,69 \cdot 10^{-3}$ |
| Среднее | $4,39 \cdot 10^{-3}$                 | $8,81 \cdot 10^{-3}$ | $9,45 \cdot 10^{-3}$ | $9,71 \cdot 10^{-3}$ |
| $R_5$   | $7,15 \cdot 10^{-3}$                 | $3,43 \cdot 10^{-2}$ | $3,91 \cdot 10^{-2}$ | $4,25 \cdot 10^{-2}$ |
|         | $7,10 \cdot 10^{-3}$                 | $3,59 \cdot 10^{-2}$ | $3,94 \cdot 10^{-2}$ | $4,19 \cdot 10^{-2}$ |
|         | $7,11 \cdot 10^{-3}$                 | $3,51 \cdot 10^{-2}$ | $3,91 \cdot 10^{-2}$ | $4,19 \cdot 10^{-2}$ |
| Среднее | $7,12 \cdot 10^{-3}$                 | $3,51 \cdot 10^{-2}$ | $3,92 \cdot 10^{-2}$ | $4,21 \cdot 10^{-2}$ |

Таблица 3 / Table 3

Результаты изменения  $e^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  и Eh /  
Results of changes in  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  and Eh

| Ре-<br>жим | Компо-<br>нент     | Ед.<br>изм. | Продолжительность ультразвуковой<br>обработки, мин. |                      |                      |                      |
|------------|--------------------|-------------|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|            |                    |             | 5                                                   | 10                   | 15                   | 20                   |
| $R_1$      | $Fe^{2+}$          | моль/г      | $3,78 \cdot 10^{-3}$                                | $3,25 \cdot 10^{-3}$ | $2,58 \cdot 10^{-3}$ | $2,28 \cdot 10^{-3}$ |
|            | $Fe^{3+}$          |             | $2,61 \cdot 10^{-4}$                                | $1,15 \cdot 10^{-3}$ | $1,82 \cdot 10^{-3}$ | $2,12 \cdot 10^{-3}$ |
|            | $Fe^{2+}: Fe^{3+}$ | ед.         | 6,1                                                 | 2,83                 | 1,42                 | 1,07                 |
|            | Eh                 | мВ          | +335                                                | +358                 | +379                 | +392                 |
| $R_2$      | $Fe^{2+}$          | моль/г      | $2,95 \cdot 10^{-3}$                                | $1,57 \cdot 10^{-3}$ | $1,81 \cdot 10^{-4}$ | 0                    |
|            | $Fe^{3+}$          |             | $1,45 \cdot 10^{-3}$                                | $2,83 \cdot 10^{-3}$ | $4,22 \cdot 10^{-3}$ | $4,66 \cdot 10^{-3}$ |
|            | $Fe^{2+}: Fe^{3+}$ | ед.         | 2,03                                                | 0,55                 | 0,043                | 0                    |
|            | Eh                 | мВ          | +364                                                | +417                 | +452                 | +462                 |
| $R_3$      | $Fe^{2+}$          | моль/г      | $1,64 \cdot 10^{-3}$                                | $10^{-10}$           | $10^{-10}$           | $10^{-10}$           |
|            | $Fe^{3+}$          |             | $2,75 \cdot 10^{-3}$                                | $5,71 \cdot 10^{-3}$ | $6,66 \cdot 10^{-3}$ | $7,05 \cdot 10^{-3}$ |
|            | $Fe^{2+}: Fe^{3+}$ | ед.         | 0,60                                                | 0                    | 0                    | 0                    |
|            | Eh                 | мВ          | +398                                                | +486                 | +508                 | +518                 |
| $R_4$      | $Fe^{2+}$          | моль/г      | $1,1 \cdot 10^{-5}$                                 | $10^{-10}$           | $10^{-10}$           | $10^{-10}$           |
|            | $Fe^{3+}$          |             | $4,39 \cdot 10^{-3}$                                | $8,81 \cdot 10^{-3}$ | $9,45 \cdot 10^{-3}$ | $9,71 \cdot 10^{-3}$ |
|            | $Fe^{2+}: Fe^{3+}$ | ед.         | 0,0025                                              | 0                    | 0                    | 0                    |
|            | Eh                 | мВ          | +468                                                | +522                 | +550                 | +556                 |
| $R_5$      | $Fe^{2+}$          | моль/г      | $10^{-10}$                                          | $10^{-10}$           | $10^{-10}$           | $10^{-10}$           |
|            | $Fe^{3+}$          |             | $7,12 \cdot 10^{-3}$                                | $3,51 \cdot 10^{-2}$ | $3,92 \cdot 10^{-2}$ | $4,21 \cdot 10^{-2}$ |
|            | $Fe^{2+}: Fe^{3+}$ | ед.         | 0                                                   | 0                    | 0                    | 0                    |
|            | Eh                 | мВ          | +525                                                | +574                 | +583                 | +589                 |

Всего было проведено 60 опытов. На каждом режиме проводилось три дублирующих опыта и выводилось среднее значение по трем опытам. Изучалось пять режимов ультразвуковой обработки оборотного раствора ПВ. Режимы обработки были приняты исходя из предварительной теоретической оценки действия ультразвука на жидкие среды.

Принятые режимы:

$R_1$  – 10 кГц, 2,5 Вт/см<sup>2</sup>,  $R_2$  – 15 кГц, 2,5 Вт/см<sup>2</sup>,  $R_3$  – 20 кГц, 2,5 Вт/см<sup>2</sup>,  $R_4$  – 25 кГц, 2,5 Вт/см<sup>2</sup>,  $R_5$  – 30 кГц, 2,5 Вт/см<sup>2</sup>.

#### Результаты исследований

Как показали результаты экспериментов, ультразвуковая обработка оборотного раствора ПВ свидетельствует о достаточно высокой эффективности звукохимической реакции окисления двухвалентного железа. Окисление двухвалент-

ного железа до трехвалентного состояния происходит достаточно интенсивно на частотах свыше 20 кГц уже в первые 7–10 мин.

Количественно  $Fe(II)$  переходит в  $Fe(III)$  наиболее интенсивно на 3–5-м режимах обработки раствора ультразвуком, причем на 5-м режиме (30 кГц, 2,5 Вт/см<sup>2</sup>) эта трансформация происходит в первые 5 мин. Видимо, в данном режиме порог кавитации интенсивно возникает и действует в растворе в первые 5–10 мин. Этот момент наблюдается и на частотах 20–25 кГц. На частотах ниже 20 кГц образование  $Fe^{3+}$  замедляется, и в исследуемых интервалах времени скорость окисления двухвалентного железа снижается. Окислительно-восстановительный потенциал оборотного раствора ПВ с увеличением времени озвучивания повышается довольно интенсивно в первые 15–17 мин. При этом наиболее интенсивно изменение Eh происходит на частоте акустических колебаний 30 кГц, достигая в интервале 7 мин +550 мВ. На частоте 25 кГц Eh +550 мВ достигается на 15-й мин. работы установки [1, 11–15].

Анализ результатов экспериментирования показал, что под действием ультразвука образующиеся в режиме кавитации гидропероксидные радикалы повышают ОВП оборотного раствора и окисляют  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ .

В растворах уран может находиться в четырех валентных состояниях:  $U^{3+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $U^{5+}$ ,  $U^{6+}$ . Многовалентность урана связана с различием энергетических связей электронов оболочек урана. Переменная валентность ведет к образованию различных комплексных соединений урана. При выщелачивании в кислой среде уран образует двухзарядные катионы уранила ( $UO_2^{2+}$ ), в щелочной – анионы уранилов и обладает слабым сродством к сере и сильным к кислороду.

Водные растворы солей трехвалентного урана весьма неустойчивы. Соли четырехвалентного урана образуют более устойчивые растворы. Кислород воздуха окисляет четырехвалентный уран в водных растворах до шестивалентного. Пятивалентный уран образует в водных растворах радикал уранила (UO) в чрезвычайно неустойчивой форме, переходящей в ионы четырех- и шестивалентного урана. Для добычи урана способом сернокислотного выщелачивания практический интерес имеют соединения шестивалентного урана. Для всех таких соединений характерно образование иона уранила  $U_2^{+}$ , определяющего свойства водных растворов солей уранила при ПВ.

Ион уранила обладает высоким сродством к воде и в нейтральных растворах гидратирован. Соли уранила сильно гидратированы и обладают выраженной кислой реакцией (рН 0,02 М раствора уранила равен 2,9). Для всех солей характерна неполная диссоциация на ионы. В сульфатной среде ион уранила – сильный комплексообразователь. В слабокислых растворах с рН = 1–2 образуются трисульфатные и дисульфатные комплексные ионы.

Соотношение простых и комплексных ионов урана, формирующихся в сульфатных растворах ПВ, зависит от кислотности раствора, содержания в нем сульфат-иона и концентрации урана.

Повышение рН раствора с 0,5 до 1,5–2,0 приводит к снижению содержания катиона уранила и резкому повышению содержания в растворе ионов уранилсульфатных комплексов. Дальнейший рост рН раствора с 2,0 до 2,5 ведет практически к исчезновению катиона уранила и замещению нейтральных молекул уранилсульфата на анионы уранилдисульфата и ура-

нитрисульфата. Причем в диапазоне pH 2,0–2,5 содержание уранилтрисульфата – практически к исчезновению катиона уранила и замещению нейтральных молекул уранилсульфата и уранилтрисульфата, а в диапазоне pH 2,0–2,5 содержание уранилтрисульфата практически возрастает до 90–100 %.

Дальнейшее повышение pH до 3,0–3,5 ведет к полимеризации ионов с образованием вследствие гидролиза комплексных ионов тридисульфат уранилдимера  $[\text{UO}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_3]^{4-}$ ,  $[\text{UO}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ . Опыт работы по переработке растворов выщелачивания позволяет заключить, что ведение сорбции в режиме pH = 3,0–3,5 приводит к повышению сорбционной емкости смолы по урану за счет того, что смола сорбирует преимущественно двухзарядные комплексы металла, которые поглощаются сильно-основными анионитами более интенсивно, чем четырехзарядные.

Исходя из этого, процесс ПВ необходимо вести при постоянном контроле pH, Eh раствора, содержания и %-ного соотношения уранилсульфатных комплексов ионов, максимально способствуя образованию в продуктивных растворах комплексных ионов дисульфат уранилдимера  $[\text{UO}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ .

В сернокислых растворах выщелачивания кроме урановых комплексов формируются и различные примеси, в частности полезные для извлечения 9 (молибден, рений, ванадий, скандий, селен и др.). В слабокислых растворах 9 pH (от 5 до 2,5) формируются анионы молибдена  $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$ ,  $\text{Mo}_4\text{O}_{13}^{2-}$ . Как правило, наличие молибдена сопровождается наличием рения. Связь рения с молибденом обусловлена изоморфизмом  $\text{MoS}_2$  и  $\text{ReS}_2$  (радиус иона  $\text{Mo}^{4+}$  равен 0,68 Å, рения  $\text{ReO} - 0,56 \text{ Å}$ ). Для технологии извлечения рения представляют интерес лишь соединения с валентными состояниями рения 7, 6, 4, и 3. К важнейшим кислородным соединениям рения относятся рениевый ангидрид  $\text{HRe}_2\text{O}_7$ , рениевая кислота  $\text{HReO}_4$  и ее соли – перенаты  $\text{NaReO}_4$ ,  $\text{NaHReO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$  и др.

Наибольшей емкостью по рению отличаются сильноосновные смолы типа АВ-17, АВ-27, АМ и др. Сродство ионов

$\text{ReO}_4^-$  к сильноосновным смолам столь велико, что рений не элюируется со смолы даже растворами едкого натра.

Кроме полезных металлов, в сернокислых растворах выщелачивания урана на стадии закисления пластов формируются макропримеси ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Zn}$  и др.

### Заключение

1. Необходимо отметить депрессирующее действие некоторых анионов раствора выщелачивания на сорбцию. Такое действие оказывают ионы:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{P}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ .

2. Изменение ОВП обратного раствора регулируется частотой ультразвука, его интенсивностью и периодом озвучивания раствора. Что касается изменений pH обратного раствора ПВ, то однозначного ответа на зависимость pH от изменения параметров ультразвуковой обработки раствора получить не удалось. Данный вопрос требует дополнительного углубленного изучения.

3. Необходимо также исследовать возможные изменения ОВП и  $\text{Fe}^{3+}$  озвученного раствора на момент подачи его в недра.

### Выводы

1. В статье приведены результаты исследований бескислотного способа повышения окислительно-восстановительного потенциала обратных растворов скважинного выщелачивания урана с использованием ультразвука и результаты лабораторных экспериментов, подтверждающих высокую эффективность разработанного способа. При этом помимо простых ионов металлов и их сульфатных комплексов в растворах появляются известные гидрокомплексы, а также бикарбонатные и карбонатные комплексы.

2. Положительные результаты опытно-промышленного опробования разработанного способа и промышленное его освоение позволит предприятиям НАК «Казатомпром» значительно (в 2–3 раза) сократить расход серной кислоты и существенно снизить себестоимость добычи урана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: Учебник для вузов: В 2 т. Москва, 2006; 1: 417.  
Avdokhin V.M. Fundamentals of Mineral Beneficiation: Textbook for Universities: In 2 Volumes. // Moscow, 2006; 1: 417. (In Russ.).
2. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация и управление. Москва, 1981: 343.  
Lynch A.J. Crushing and Grinding Cycles. Modeling, Optimization, and Control. Moscow, 1981: 343. (In Russ.).
3. Лазарева О.В., Подкаменный Ю.А. Автоматизированный способ управления комплексом измельчения и классификации алмазосодержащих руд. *Вестник ИргТУ*. 2014; 4: 128-133.  
Lazareva O.V., Podkamenny Yu.A. Automated Method for Controlling a Complex for Grinding and Classifying Diamond-Bearing Ores. *Vestnik of IrSTU*. 2014; 4: 128-133. (In Russ.).
4. King R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann, 2001: 404.
5. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., Fedotenko N.A. Radiometric sorting of ore in uranium leaching. *Eurasian Mining*. 2025; 1: 91-94. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2425/article/39738/?language=en>. <https://doi.org/10.17580/em.2025.01.18>.
6. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., Miletchenko N.A. Geological aspects of uranium deposits for in-situ leaching application to develop energy potential of Kazakhstan. *Eurasian Mining*. 2024; 2: 19-22. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2364/article/38888>. <https://doi.org/10.17580/em.2024.02.04>.
7. Цой С.В., Жусупбеков С.С. Основы разработки гидрогенных месторождений урана. Алматы, 2016: 320.  
Tsoi S.V., Zhusupbekov S.S. Fundamentals of Development of Hydrogenetic Uranium Deposits. Almaty, 2016: 320. (In Russ.).
8. 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>.
9. Орынгожин Е.С., Бишимбаева Г.К., Метакса Г.П. и др. Применение подземного скважинного выщелачивания урана на месторождении Семизбай. *Межд. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы урановой промышленности»*. Алматы, 2019: 98-104.  
Oryngozhin E.S., Bishimbayeva G.K., Metaksa G.P., et al. Application of in-situ leaching of uranium at the Semizbay deposit. *Int. scientific-practical. conf. "Actual problems of the uranium industry"*. - Almaty, 2019: 98-104. (In Russ.).

10. Щадов М.И., Артемьев В.Б. и др. Природный потенциал ископаемых углей. Рациональное использование их органического вещества. Москва, 2000; 2: 202.  
Shchadov M.I., Artemyev V.B., et al. Natural potential of fossil coals. Rational use of their organic matter. Moscow, 2000;2: 202. (In Russ.).
11. Шестаков В.А. Проектирование горных предприятий: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, 2003: 96.  
Shestakov V.A. Design of mining enterprises. Textbook for universities. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, 2003: 96. (In Russ.).
12. Суходолов А. П. Мировые запасы урана: перспективы сырьевого обеспечения атомной энергетики. *Известия Иркутской государственной экономической академии*. 2010; 4 (72): 166-169.  
Sukhodolov A. P. World uranium reserves: prospects for raw material supply for nuclear energy. *Bulletin of the Irkutsk State University of Economics*. 2010; 4 (72): 166-169. (In Russ.).
13. Aben E., Akhmetkanov D., Aben Kh. Investigation of the solidox idizereffecton the metalgeotechnology efficiency. *Mining of Mineral Deposits*, 2023; 17 (4): 12-17. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.012>.
14. Yussupov Kh., Aben E., Myrzakmetov S., et al. Increasing the Efficiency of Underground Block Leaching of Metal. *Civil Engineering Journal (C.E.J)*. 2024; 10 (10): 339-349. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-10-014>.
15. Поезжаев И.П., Полиновский К.Д., Горбатенко О.А. и др. Геотехнология урана: учебное пособие. Алматы, 2017: 327.  
Poezhaev I.P., Polinovskiy K.D., Gorbatenko O.A. et al. Uranium Geotechnology: A Tutorial. - Almaty.2017: 327. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Ренат Асылбекович Юсубалиев -**

соискатель, Национальная инженерная академия  
Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан;  
<https://orcid.org/0000-0001-8993-9986>

### **Ерназ Советович Орынгожин -**

доктор технических наук, КазНУ им. Аль-Фараби, главный  
научный сотрудник ИГД им. Д.А. Кунаева, г. Алматы,  
Республика Казахстан

### **Махамбет Кудайбергенович Джексенов -**

кандидат географических наук, Атырауский университет  
имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика  
Казахстан; <https://orcid.org/0000-0002-1741-3931>

### **Ералы Ерназулы Орынгожа -**

докторант PhD, Алматинский университет энергетики и  
связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан;  
[e24.01@mail.ru](mailto:e24.01@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9130-0994>

### **Наталья Александровна Милетенко -**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт проблем комплексного освоения недр им.  
академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская  
Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

### **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: 03.04.2026

Поступила после рецензирования: 16.05.2026

Принята к публикации: 04.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

### **Renat A. Yusubaliev -**

Surveyor, National Engineering Academy of the Republic of  
Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan; <https://orcid.org/0000-0001-8993-9986>

### **Yernaz S. Oryngozhin -**

Dr. Sci. (Eng.), Al-Farabi Kazakh National University, Chief  
Researcher at the Institute of Mining named after D.A. Kunaev,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

### **Makhambet K. Djexenov -**

Cand. Sci. (Geography), Atyrau university named after  
H. Dosmukhamedova, Atyrau, Republic of Kazakhstan;  
<https://orcid.org/0000-0002-1741-3931>

### **Yeraly Ye. Oryngozha -**

PhD doctoral student, Almaty University of Power  
Engineering and Telecommunications named after Gumarbek  
Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan; [e24.01@mail.ru](mailto:e24.01@mail.ru);  
<https://orcid.org/0000-0002-9130-0994>

### **Natalya A. Miletenko -**

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of  
Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after  
academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

### **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: 03.04.2026

Revised: 16.05.2026

Accepted: 04.06.2026

## Определение рациональных параметров «выемочной единицы» для горнотехнических условий открытой разработки фосфоритовых месторождений

А. Ю. Ерошев<sup>1</sup>, С. И. Фомин<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>АО «ВНИИ Галургии», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет Екатерины II», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ [fominsi@mail.ru](mailto:fominsi@mail.ru)

**Резюме.** Для определения оптимальных границ карьера необходимо создание блочной модели месторождения, на основе которой может быть получена предельная и вложенные оболочки карьера, произведен обоснованный выбор границ карьера, определены параметры выемочных единиц. Временные этапы отработки карьера могут быть получены на основе установленных вложенных оболочек, позволяющих формировать участки временно нерабочего борта для усреднения и стабилизации коэффициента вскрыши. Выбор контуров карьера оказывает прямое влияние на производительность, продолжительность эксплуатации месторождения, объемы как промышленно значимых запасов полезного ископаемого, так и вскрышных пород, удаляемых из карьера. Параметры рабочей зоны карьера служат определяющим фактором при выборе способа вскрытия, расположения системы съездов и размещении объектов инфраструктуры горнодобывающего предприятия, включая поверхностные здания, сооружения и транспортные артерии. Величина выемочной единицы по-разному проявляется на стадиях нормирования и фактического определения потерь руды и должна учитывать горно-геологические и горнотехнические условия карьеров, разрабатывающих фосфоритовые месторождения. При нормировании потерь достаточно знать достоверные контуры залежей, количество и качество балансовых запасов по выемочным единицам и теоретические связи между потерями и засорением. Однако фактическое определение потерь и засорения полезных ископаемых при отсутствии технических средств, необходимых для их учета, возможно лишь косвенным путем: по уравнениям баланса руды и металла. Результаты исследований могут быть полезными при проектировании и планировании горных работ для горнотехнических условий открытой разработки фосфоритовых месторождений.

**Ключевые слова:** фосфоритовые месторождения, рудное месторождение, открытая разработка, качество руды, оптимальный объем, выемочная единица, коэффициент вскрыши, потери, разубоживание

**Благодарности, признательность:** Авторы признательны компаниям ТОО «Казфосфат» и АО «ВНИИ Галургии» за содействие в организации исследований, предоставление геологических данных и ценные экспертные комментарии. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

**Для цитирования:** Ерошев А.Ю., Фомин С.И. Определение рациональных параметров «выемочной единицы» для горнотехнических условий открытой разработки фосфоритовых месторождений. *Маркиейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 33-38. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-33-38>.

## Determination of «mining unit» rational parameters for the opencast mining conditions of phosphorite ore deposits

A. Yu. Eroshev<sup>1</sup>, S. I. Fomin<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>VNII Galurgii JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ [fominsi@mail.ru](mailto:fominsi@mail.ru)

**Abstract.** The choice of opencast contours has a direct impact on productivity, the duration of field operation, and the volume of both industrially significant mineral reserves and overburden removed from the opencast mine. The parameters of the opencast's working area serve as a determining factor in choosing the opening method, the location of the technological system, and the location of

mining infrastructure facilities, including surface buildings, structures, and transport arteries. When deciding what to understand by a mining unit, one should proceed from the purposes for which this concept is introduced, and the objective mining and geological conditions of the field development. In an effort to achieve a real technical and economic effect resulting from loss and clogging control, the difference between mining units is insignificant, since control over the extraction of minerals must be carried out systematically, especially when mining ore - waste rock contacts. Monitoring the development of reserves only by comparing actual production figures with their planned or regulatory values, as is currently being done, cannot be effective regardless of whether it is carried out over the operational horizon or over the opencast as a whole. When determining a mining unit, it is necessary to take into account the expediency and cost-effectiveness of accounting for the extracted ore in terms of quantity and quality of mineral raw materials. The purpose of the study was to consider the techniques of definition the optimal mining unit during opencast mining for technical conditions of steeply dipping ore deposits. Mining-technical analysis to achieve a real technical and economic effect resulting from loss and clogging control, the difference between excavation units is insignificant, since control over the extraction of minerals must be carried out systematically, especially when mining ore - waste rock contacts. To determine the rational parameters of the opencast's working area serve as a determining factor in choosing the opening method, the location of the technological system, and the location of mining infrastructure facilities, including surface buildings, structures, and transport arteries. The research results can be useful when designing and planning mining operations for the geological conditions of opencast phosphate deposits.

**Keywords:** opencast mining, ore quality, optimal volume, ore deposits, mining unit, stripping ratio, economic loss, mineral dilution

**Acknowledgments:** The authors are grateful to Mining and Processing Complex, Kazphosphate LLP, VNII Galurgii JSC for their assistance in organizing the research, providing geological data, and valuable expert comments. The research was funded by the authors.

**For citation:** Eroshev A.Yu., Fomin S.I. Determination of «mining unit» rational parameters for the opencast mining conditions of phosphorite ore deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 33-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-33-38>.

### Введение

В теории и практике недропользования применяются различные трактовки термина «выемочная единица», получившие отражение в нормативных документах, таких как Закон РФ «О недрах», Налоговый кодекс РФ, Правила охраны недр. В современных условиях, когда функции по нормированию, оценке фактических эксплуатационных потерь и засорения руд передаются от Ростехнадзора структурам МПР РФ, целесообразно применять системный подход к обоснованию понятия «выемочная единица».

В нормативных документах отмечается, что нормирование потерь и засорения следует проводить по каждому выемочному блоку при обеспечении высокой достоверности оконтуривания залежи в пределах выемочного блока. Под «выемочной единицей» понимается наименьший участок месторождения, обрабатываемый одной системой разработки, для которого определены балансовые запасы и ведется отдельный учет добычи рудной массы по количеству и содержанию в ней металла [1–6], или минимальный участок месторождения с относительно однородными геологическими условиями, обработка которого осуществляется одной системой разработки и технологической схемой выемки (уступ, блок, панель, лава, камера и т. п.) и в пределах которого с достаточной достоверностью определены запасы и возможен первичный учет извлечения полезных ископаемых и компонентов [7–10].

При нормировании эти величины определяются как расчетные на основе математического моделирования отработки контактов. Отсутствие мобильных взвешивающих устройств и аппаратуры по экспресс-анализу качества рудной массы в навале непосредственно в забоях, применение в крупных карьерах каскадного взрывания, когда отбитая горная масса перемещается с вышележащих на нижележащие горизонты, перегрузочных складов, аккумулирующих добываемую руду с нескольких горизонтов, приводит к тому, что достоверный учет добычи и потерь полезных ископаемых возможен только по карьере в целом. Поэтому

на стадии фактического определения потерь в крупных карьерах «выемочную единицу» представляет весь карьер в годовых контурах отработки.

Стремление уменьшить размер «выемочной единицы» оправдано, так как это может повысить оперативность и действенность контроля над рациональным использованием запасов полезных ископаемых при добыче. В идеале этот размер следует довести до объема ковша экскаватора, но пока переход даже к такой «выемочной единице», как эксплуатационный горизонт, а тем более взрывной блок, требует разработки и внедрения мобильных взвешивающих устройств по определению количества руды в транспортных сосудах на каждом эксплуатационном горизонте карьера.

При стремлении к достижению реального технико-экономического эффекта, полученного в результате контроля над потерями и засорением, разница между «выемочными единицами» (уступ или карьер в целом) незначительна, так как контроль над добычей полезного ископаемого должен вестись систематически, особенно при отработке рудо-породных контактов. Контроль отработки запасов только путем сравнения фактических показателей добычи с их плановыми или нормативными значениями, как это делается сейчас, не может быть эффективным независимо от того, будет ли он выполняться по эксплуатационному горизонту или по карьере в целом.

При определении «выемочной единицы» необходимо принимать во внимание целесообразность и эффективность затрат на поуступный учет добываемой руды по количеству и качеству минерального сырья.

**Цель исследования:** определение рациональных параметров «выемочной единицы» для горнотехнических условий открытой разработки фосфоритовых месторождений.

### Объект исследований

Результаты исследований основаны на анализе опыта работы карьеров по добыче фосфоритовых руд при отработке сложноструктурных месторождений.

### Методы исследования

Модель запасов создана путем регуляризации, заключающейся в приведении ячеек блочной модели к одному размеру, удовлетворяющему понятию минимальной «выемочной единицы». Это общепризнанный мировой метод, применяемый для оптимизации границ карьеров в крупных горнодобывающих компаниях (ПАО «Полюс», Rio Tinto Group, ПАО «Селигдар» и т. д.) [11–15].

Оптимизатор «выемочных единиц» Mineable Stope Optimiser (MSO) основан на методе, имеющем расширенные настройки, определяющие области в пределах ресурсной модели месторождения, которые экономически целесообразно отрабатывать. Формирование рациональной рабочей зоны карьера возможно на основе блочной модели месторождения при унификации элементарных блоков к требованиям минимальной «выемочной единицы» (Selective Mining Unit – SMU).

### Результаты исследований

В результате проведенного анализа была проведена оптимизация параметров «выемочных единиц». Уменьшение размера «выемочной единицы» не может привести к существенному сокращению фактических потерь и разубоживания в карьерах, так как оно будет лишь способствовать повышению оперативности контроля над рациональным использованием недр, но не повлияет существенно на технологию горных работ. Раздельное взрывание руды и породы, обеспечивающее возможность прямых методов учета потерь и засорения, приведет к значительному и неоправданному снижению производительности горных работ.

Кроме того, раздельное взрывание влечет за собой снижение числа одновременно взрывающихся рядов скважин, дополнительный разброс и перемешивание руды и породы в приконтактных зонах. Повышение достоверности учета потерь и разубоживания достигается за счет роста их уровня, что нельзя признать целесообразным. Наоборот, необходимо стремиться к увеличению числа одновременно взрывающихся рядов скважин, росту объемов взрывных блоков, что помимо сокращения простоев, повышения выхода горной массы с 1 м скважины, роста производительности оборудования позволит дополнительно снизить потери и разубоживание за счет более полного сохранения структуры массивов приконтактных зон.

Принятие «выемочной единицы» по горизонту вместо карьера в целом приводит к недопустимому росту погрешностей в определении фактических потерь. При реализации проекта уточняются различные горнотехнические параметры, влияющие на нормативы эксплуатационных потерь: изменение направления развития горных работ, вариация долей согласных и несогласных заходов при добыче руды, изменение положения очистных заходов относительно поверхности контакта руды с породой (в плане) и др.

Уменьшение размера «выемочной единицы» само по себе не приведет к существенному сокращению фактических потерь и разубоживания руды, что лишь повысит оперативность контроля над рациональным использованием недр, но не окажет влияния на технологию ведения горных работ.

Раздельное взрывание руды и вмещающих пород, позволяющее применять прямые методы учета потерь и разубоживания, приведет к значительному и необоснованному снижению производительности карьера.

Для горнотехнических условий карьера по добыче фос-

форитов оптимизация выемочных единиц была выполнена в двух вариантах:

- 1) «выемочная единица» размером 5 на 5 м с углом откоса рабочего уступа 30°;
- 2) «выемочная единица» размером 5 на 5 м с углом откоса рабочего уступа 40°.

Под минимальной «выемочной единицей» понимается минимальный подсчетный объем руды, который может быть селективно добыт и перемещен транспортными средствами к месту потребления, складирования или переработки.

Как правило, на рудных карьерах параметры SMU характеризуются высотой уступа, а в плане – прямоугольником со сторонами, равными или превышающими параметры ковша экскаватора [16]. Тоннаж как функция объема и плотности горной массы для выемочного блока не должен быть меньше грузоподъемности используемой модели транспортного средства. Размер SMU для каждого месторождения обосновывается с учетом горно-геологических и горнотехнических условий отработки и анализов результатов добычи руды. Поскольку разброс содержаний в SMU намного меньше, чем в пробах, коррекция основания уменьшает распределение. При этом изменяется часть распределения, превышающая выбранное бортовое содержание, что изменяет тоннаж и содержания по сравнению с бортовыми и может рассматриваться как отражение влияния потерь и разубоживания руды, а также ожидаемого извлечения полезных компонентов.

Варианты исходных данных для построения модели запасов руды при различных размерах «выемочной единицы» представлены в таблице 1.

Для подсчета объемов запасов в каркасах MSO подготовлена рудопородная модель, выполнено объединение блочной модели ресурсов с породной моделью месторождения.

Оптимизация выемочных единиц выполнена в двух вариантах:

- «выемочная единица» размером 5 м на 5 м с углом откоса рабочего уступа 30°;
- «выемочная единица» размером 5 м на 5 м с углом откоса рабочего уступа 40°.

Высота «выемочной единицы» во всех рассмотренных вариантах принята 7,5 м, что соответствует установленным параметрам отработки уступов.

Сравнительные результаты реализации моделей запасов по вариантам MSO представлены в таблице 2.

Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние выполаживания угла откоса рабочего уступа оказывает на величину запасов бедной руды по рассмотренным вариантам. Выполнен сравнительный анализ вариантов отработки рудных блоков под углами откосов уступов 30° и 40° на примере гидравлического экскаватора Komatsu PC1250 типа «обратная лопата».

На эпюре рабочих зон (рисунок) показаны три режима работы, выделенные цветом: голубой – длина рукояти 5,7 м; красный – длина рукояти 4,5 м; черный – длина рукояти 3,4 м.

Для оценки возможности экскавации на эпюру нанесены уступы, принятые в каркасах MSO: красный – уступ с углом откоса 30° нижним черпанием; синий – уступ с углом откоса 40° нижним черпанием; фиолетовый – минимальный угол выемки верхним черпанием. Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что при угле откоса 30° отработка уступа возможна только за две заходки, и, как следствие, уменьшается производительность экскаватора.

Таблица 1 / Table 1

Варианты исходных данных построения модели запасов руды для различных размеров «выемочной единицы» /  
Options for the initial data for building a ore reserve model for various sizes of the mining unit

| Тип руды /<br>Ore type                 | Модель ресурсов /<br>Ore reserve model        |                                   | «Выемочная единица»<br>3 на 3 м /<br>Mining unit |                                   | «Выемочная единица»<br>5 на 5 м /<br>Mining unit |                                   | «Выемочная единица»<br>7 на 7 м / Mining unit |                                   |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|
|                                        | Колич. тыс. т /<br>Quantity, thousand<br>tons | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % | Колич. тыс. т /<br>Quantity, thousand<br>tons    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % | Колич. тыс. т /<br>Quantity, thousand<br>tons    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % | Колич. тыс. т /<br>Quantity, thousand<br>tons | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % |
| Бедная руда /<br>Poor ore              | 181 476                                       | 25,43                             | 192 353                                          | 23,14                             | 195 180                                          | 23,10                             | 200 070                                       | 23,00                             |
| Богатая руда /<br>Rich ore             | 94 239                                        | 29,96                             | 63 332                                           | 29,42                             | 59 943                                           | 29,40                             | 54 392                                        | 29,37                             |
| Всего / Total                          | 275 715                                       | 26,98                             | 255 685                                          | 24,70                             | 255 123                                          | 24,58                             | 254 462                                       | 24,36                             |
| Потери / Loss, %                       | 0                                             |                                   | 15,7                                             |                                   | 16,3                                             |                                   | 17,3                                          |                                   |
| Разубоживание /<br>Mineral dilution, % | 0                                             |                                   | 9,1                                              |                                   | 9,5                                              |                                   | 10,3                                          |                                   |

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализа данных по реализации моделей запасов по вариантам MSO /  
Results of data analysis on the implementation of inventory models according to MSO options

| Тип руды /<br>Ore type              | MSO (30°)     |                                   | MSO (40°)     |                                   | Отклонение / Deviation |                                   |
|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
|                                     | Руда / Ore, т | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % | Руда / Ore, т | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % | Руда / Ore, т          | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % |
| Запасы / ore reserve                | 272 208 969   | 25,59                             | 266 831 938   | 25,08                             | -5 377 031             | -0,51                             |
| Бедная руда / Poor ore              | 72 899 856    | 29,71                             | 70 435 074    | 29,72                             | -2 464 782             | 0,01                              |
| Богатая руда / Rich ore             | 190 858 174   | 25,10                             | 185 509 357   | 24,72                             | -5 348 817             | -0,38                             |
| Концентрат / Concentrate            | 697 766       | 12,36                             | 937 711       | 12,34                             | 239 945                | -0,03                             |
| Порода / Overburden                 | 7 753 173     | 0,00                              | 9 949 796     | 0,00                              | 2 196 623              | 0,00                              |
| Потери / Loss, %                    | 7,4           |                                   | 9,4           |                                   | -                      |                                   |
| Разубоживание / mineral dilution, % | 3,1           |                                   | 4,1           |                                   | -                      |                                   |

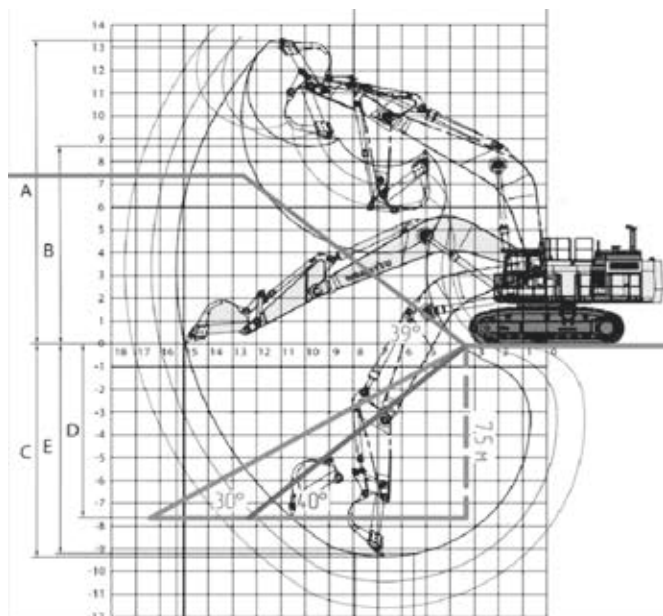


Рис. Технологическая схема рабочих зон гидравлического экскаватора Komatsu PC1250 с уступами каркасов MSO /

Fig. Technological scheme of the Komatsu PC1250 hydraulic excavator working zones with MSO frame steps

При отработке уступа с углом откоса 40° нижним черпанием, где зубья ковша вплотную подходят к границе «красной линии», необходимо использовать рукоять максимальной длины, что обусловлено отсутствием запаса для поворота ковша. Напротив, при отработке уступа с аналогичным углом

с помощью верхнего черпания требуется экскаватор с укороченной рукоятью. Следует отметить, что чем длиннее рукоять экскаватора, тем меньше номинальный объем горной массы, который он способен вместить. По данным производителя, при угле откоса 30° объем ковша составляет 3,4 м³, а при 40° – 5,2 м³.

### Заключение

1. Рациональным решением в данных горнотехнических условиях является отработка уступа под углом 40° способом верхнего черпания экскаватором Komatsu PC1250 типа «обратная лопата» с рукоятью длиной 3,4 м и ковшом объемом 5,2 м³ (или аналогичной моделью).

2. В иных случаях, когда экскаватор оснащен ковшом объемом 3,4 м³, его производительность снижается. Учитывая данные по производительности и незначительную разницу в объемах руды по каркасам MSO, для оптимального формирования границ карьера целесообразно применять модель запасов, полученную на основе MSO с углом откоса 40°.

3. Основные усилия горнодобывающих предприятий и контролирующих органов необходимо направлять не на уменьшение размеров выемочной единицы, а на внедрение ресурсосберегающих технологий.

4. Необходимо в каждой выемочной единице выделять границы контактной рудо-породной зоны посредством оконтуривания контактных зон, позволяющее минимизировать величину среднеквадратического отклонения содержания полезных компонентов в пределах выемочной единицы, так

как при приближении к периферии рудных тел содержание полезных компонентов снижается.

5. Параметры выемочной единицы должны обеспечивать объем работы горного оборудования на период не менее одних суток для возможности оперативного планирования суточных объемов добычи в целом по карьере и требуемых поставок руды на обогащательную фабрику. Ширина выемоч-

ной единицы должна быть не менее одной ширины заходки добычного оборудования.

6. Определение параметров выемочной единицы рудных карьеров следует проводить с учетом применяемой технологии горных работ и обеспечения нормативных потерь и разубоживания руды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Ерошев А.Ю. Организация рационального недропользования на основе оптимизации выемочной единицы для горнотехнических условий карьеров по добыче фосфоритов. *Научные исследования – основа современной инновационной системы: сборник статей Международной научно-практической конференции*: в 2 ч. Уфа, 2025; 1: 52-55.
- Eroshov A. Yu. Organization of rational subsurface use based on optimization of the excavation unit for mining conditions of phosphorite quarries. *Scientific research is the basis of a modern innovation system: a collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*: at 2 p.m. Ufa, 2025; 1: 52-55. (In Russ.).
- Капутин Ю.Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ. Санкт-Петербург, 2017; 280.
- Kaputin Yu.E. Substantiation of on-board maintenance and optimization of the strategy for the development of open-pit mining operations. St. Petersburg, 2017: 280. (In Russ.).
- Фомин С.И., Говоров А.С. Обоснование выбора бортового содержания полезных компонентов в руде при проектировании карьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 12: 169-178. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_12\\_0\\_169](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_169).
- Fomin S.I., Govorov A.S. Substantiation of the choice of the cut-off content of useful components in the ore in the design of opencast. *Mining informational and analytical bulletin*. 2023; 12: 169-178. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_12\\_0\\_169](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_169).
- Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и др. Открытые горные работы – XXI век: Справочник. Под ред. К. Ю. Анистратова. Москва, 2019; 1: 640.
- Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu. et al. Opencast mining – XXI century. Handbook. Edited by K.Y. Anistratov. Moscow, 2019; 1: 640. (In Russ.).
- Капутин Ю.Е. Информационные технологии планирования горных работ. Санкт-Петербург, 2008: 420.
- Kaputin Yu.E. Information technologies of mining planning. St. Petersburg, 2008: 420. (In Russ.).
- Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров: Учеб. для вузов: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 2001; I: 519.
- Trubeckoj K.N., Krasnyanskij G.L., Hronin V.V. Quarry Design: Textbook for Higher Education Institutions: In 2 vols. Moscow, 2001; I: 519. (In Russ.).
- Арсентьев А.И. Производительность карьеров. Санкт-Петербург, 2002: 85.
- Arsentev A.I. Quarry productivity. Saint Petersburg, 2002: 85. (In Russ.).
- Анистратов К.Ю., Анистратов Ю.И., Щадов М.И. Горное дело. Москва, 2010: 700.
- Anistratov K.Yu., Anistratov Yu.I., Shchadov M.I. Mining. Moscow, 2010: 700. (In Russ.).
- Аленичев В.М., Сытенков В.Н., Корнилов С.В. и др. Стратегия управления открытыми горными работами. *Горный журнал*. 2020; 3: 34-39. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.03.06>.
- Alenichev V.M., Sytenkov V.N., Kornilov S.V., et al. Open pit mining management strategy. *Mining Magazine*. 2020; 3: 34-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.03.06>.
- Соколов И.В., Смирнов А.А., Никитин И.В. Методика экономической оценки долгосрочных стратегических решений при комбинированной разработке рудных месторождений. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2021; 3: 314-325. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-308-319>.
- Sokolov I.V., Smirnov A.A., Nikitin I.V. Methodology of economic evaluation of long-term strategic decisions in the combined development of ore deposits. *News TulGU. Earth Sciences*. 2021; 3: 314-325. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-308-319>.
- Armstrong M., Lagos T., Emery X., et al. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources*. 2021; 72: 515-529. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>.
- Капутин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. Санкт-Петербург, 2002: 424.
- Kaputin Yu.E. Mining computer technologies and geostatistics. St. Petersburg, 2002: 424. (In Russ.).
- Лушников В.Н., Селиванов Д.А., Бережной В.П. Надежность прогнозирования геотехнических рисков при ведении открытых горных работ. *Горный журнал*. 2023; 1: 4-13. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.015>.
- Lushnikov V.N., Selivanov D.A., Berezhnoy V.P. Reliable prediction of geotechnical risks in open pit mining. *Mining Magazine*. 2023; 1: 4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.03.05>.
- Seyyed-Omid Gilani J., Sattarvand M., Hajihassani S.S., et al. Stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020; 68: 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101738>.
- Hustrulid W., Kuchta M. Open Pit Mine: Planning & Design. Rotterdam; Brookfield, VT: A.A. Balkema, 1998; 735.
- Fomin S.I., Ivanov V.V., Semenov A.S. et al. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020; 15: 1306-1311.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Андрей Юрьевич Ерошев –**

аспирант АО «ВНИИ Галургии», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. Заместитель генерального директора по горно-перерабатывающему комплексу ТОО «Казфосфат», г. Алматы, Республика Казахстан

### **Сергей Игоревич Фомин –**

д-р техн. наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: fominsi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

### **Критерии авторства:**

А. Ю. Ерошев – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; С. И. Фомин – оценка результатов и коррекция написанной работы; выборка и сбор материала для исследований.

### **Конфликт интересов:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 19.05.2026

Поступила после рецензирования: 07.06.26

Принята к публикации: 19.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

### **Andrey Yu. Eroshev –**

Postgraduate student of VNII Galurgii JSC. Saint Petersburg, Russian Federation. Deputy General Director for Mining and Processing Complex, Kazphosphate LLP. Almaty, Republic of Kazakhstan

### **Sergey I. Fomin –**

Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University. Saint Petersburg. Russian Federation; e-mail: fominsi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

### **Contribution:**

Andrey Yu. Eroshev – research concept, formulation of the conflict between the current paradigm and new facts, drafting the manuscript; Sergey I. Fomin evaluation of results and revision of the manuscript; data sampling and collection for the research.

### **Conflict of interest:**

The authors declare no conflict of interest.

### **Article info**

Received: 19.05.2026

Revised: 07.06.26

Accepted: 19.06.2026

## Обоснование мощности потолочины камер при разработке обводненных месторождений гипса

А. Н. Дулин, Б. Г. Догузов✉

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»,  
г. Новочеркасск, Российская Федерация  
✉ [doguzovbg@mail.ru](mailto:doguzovbg@mail.ru)

**Резюме.** В работе исследована роль защитной пачки гипса, оставляемой в потолочине камер при камерно-столбовой системе разработки нерудных месторождений. Отмечается недостаточная изученность вопроса при отработке участков с различной трещиноватостью. Защитная пачка рассматривается как ключевой фактор гидроизоляции очистной зоны от Нижне-казанских водоносных горизонтов Бебяевского месторождения. Проведены исследования по установлению коэффициентов структурного ослабления гипсового массива на Бебяевском месторождении, которые использованы в предложенной методике расчета предохранительных целиков с учетом физико-механических свойств пород и глубины горных работ. Оптимизация толщины потолочины до 1,0 м в зависимости от трещиноватости массива позволит дополнительно извлекать из одной панели до 1 610 м<sup>3</sup>, что существенно снизит потери без увеличения затрат на добычу. Данная методика может быть рекомендована для отработки обводненных месторождений гипса, залегающих на глубине до 250 м.

**Ключевые слова:** гипс, трещиноватость, закарстованность, обводненность, каверны, потолочина камер

**Для цитирования:** Дулин А.Н., Догузов Б.Г. Обоснование мощности потолочины камер при разработке обводненных месторождений гипса. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 39-44. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-39-44>.

## Justification of the capacity of the chamber ceiling during the development of flooded gypsum deposits

A. N. Dulin, B. G. Doguzov✉

South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation  
✉ [doguzovbg@mail.ru](mailto:doguzovbg@mail.ru)

**Abstract.** The paper investigates the role of a protective gypsum pack left in the ceiling of chambers during a chamber-pillar system for the development of non-metallic deposits. There is an insufficient study of the issue during the development of sites with various fractures. The protective pack is considered as a key factor in waterproofing the treatment area from the Nizhnekazansky aquifers of the Bebyaevsky field. Studies have been conducted to establish the coefficients of structural weakening of the gypsum massif at the Bebyaevsky deposit, which are used in the proposed method for calculating safety pillars, taking into account the physical and mechanical properties of rocks and the depth of mining operations. Optimizing the thickness of the ceiling to 1.0 m depending on the fracturing of the array, it will allow additional extraction of up to 1610 m<sup>3</sup> from one panel, which will significantly reduce losses without increasing production costs. This technique can be recommended for mining flooded gypsum deposits at depths up to 250 m.

**Keywords:** gypsum, fracturing, karstification, water saturation, cavities, ceiling of the cameras

**For citation:** Dulin A.N., Doguzov B.G. Justification of the capacity of the chamber ceiling during the development of flooded gypsum deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-39-44>.

## Введение

Рациональная разработка месторождений полезных ископаемых предполагает наиболее полное их извлечение. На практике эта задача всегда актуальна, но связана с определенными сложностями как технологического характера, так и обеспечения безопасных условий ведения работ [1].

В настоящее время использование гипса имеет первостепенное значение для развития сырьевой базы производства строительных материалов. Рост спроса на экологичные материалы уже сегодня формирует новые вызовы: по прогнозам Ассоциации производителей гипса, к 2030 г. потребление гипсокартона в России достигнет 320 млн м<sup>2</sup>/год, что требует увеличения добычи сырья на 25–30 % [2].

Из всех месторождений гипса, расположенных на территории РФ, наиболее сложным по гидрогеологическим условиям залегания является Бебьевское месторождение, расположенное в Нижегородской области.

**Цель исследований:** обоснование мощности потолочных камер при разработке обводненных месторождений гипса.

## Методы исследований

Для количественной оценки трещиноватости, закарстованности карбонатных и сульфатных пород и с целью расчета устойчивости потолочины и междукамерных целиков в выработанном пространстве на участке Z (рис. 1) проанализировано появление карстовых полостей по пробуренным скважинам.

В скважинах 88-114, 88-115 и других выявлены вытянутые (от 0,5 до 3 м и частично больше) разрушенные карстовые полости на глубинах от 43,5 до 58,5 м. Отрабатываемые пласты III–VI расположены между двумя водоносными горизонтами: нижнеказанским (безнапорным горизонтом, в кровле пластов) и сакмарским (напорным горизонтом, в почве пластов), обуславливающими обводнение отрабатываемых пластов.

В гипсовом пласте каверны встречаются от 0,3 до 0,5 м, частично заполнены водой. В результате проведенного анализа буровых журналов, сменных осмотров подготовительных

и очистных выработок, лабораторных экспериментов установлены поправочные коэффициенты структурного ослабления для двух категорий закарстованности на Бебьевском месторождении ( $k_c-0,1$ ,  $k_c-0,15-0,3$ ) (табл. 1). Установленные коэффициенты применяем при расчете предохранительного целика в кровле камер и опорных целиков.

Таблица 1 / Table 1

Категорирование участков массива  
по степени карстовой опасности /  
Categorization of the massif sections according  
to the degree of karst danger

| Категория     | Тип полостей                          | Степень снижения прочности, % | Рекомендуемые меры             |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| I (низкая)    | Одиночные каверны <0,2 м              | До 10                         | Стандартный расчет целиков     |
| II (средняя)  | Сеть каналов, каверны от 0,3–0,5 м    | 10–30                         | Увеличение ширины целика       |
| III (высокая) | Каверны более 1,0 м, сквозные колодцы | >30                           | Закладка пустот или обход зоны |

## Результаты исследований

Обследование состояния потолочины выработок выполнялось на локальных, отрабатываемых участках шахтного поля, наиболее проблематичных с точки зрения общей геомеханической устойчивости шахтного поля.

Анализ отслоений пород на центральном участке месторождения показал, что зависимость между мощностью отслоений (0,1, 0,2, 0,3 м и выше) и площадью подчиняется логарифмически нормальному распределению. Увеличение объемов каверн связано со снижением трещиноватости. Поэтому при расчете ослабления массива следует учитывать наибольшее значение коэффициента трещиноватости или каверн. При заполнении трещин и каверн водой и глиной растет структурное ослабление пород, что приводит к увеличению потолочины и опорных целиков.

В качестве исходных данных для расчетов приняты

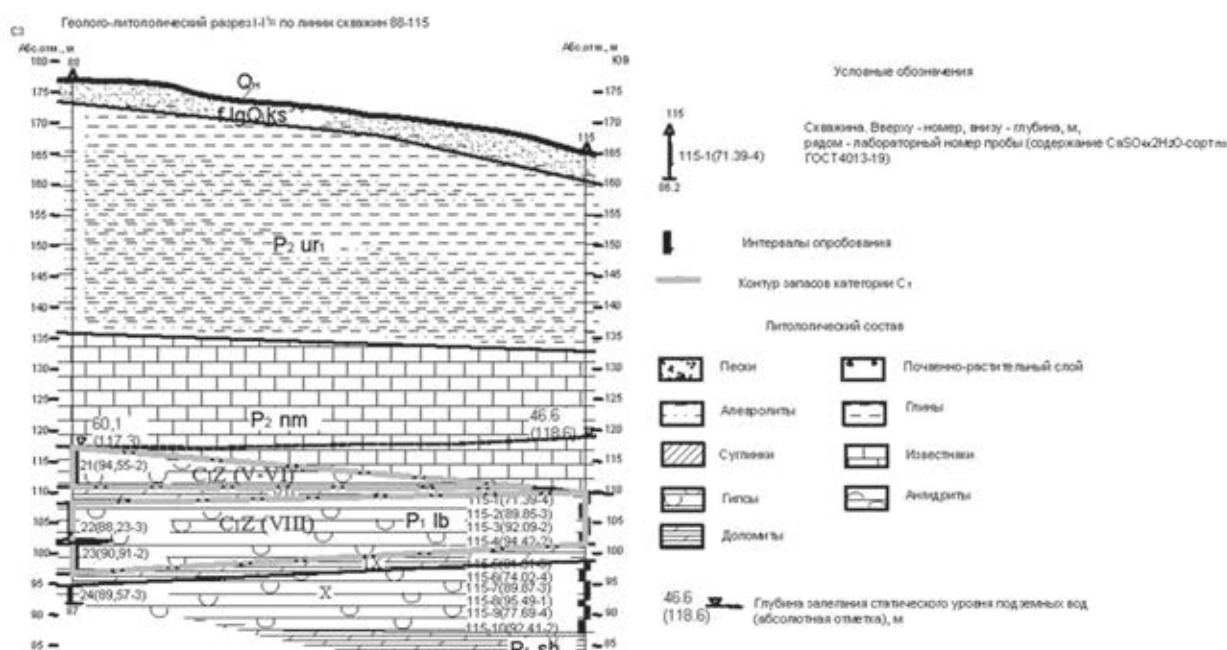


Рис. 1. Геологический разрез по скважинам 88-115 / Fig. 1. Geological section for boreholes 88-115

усредненные физико-механические характеристики гипса и вмещающих горных пород (табл. 2 и 3), приведенные в отчете по предварительной разведке Южного участка Бебьевского месторождения гипса.

Таблица 2 / Table 2

**Физико-механические свойства гипса, принятые для расчета / Physico-mechanical properties of gypsum used for calculation**

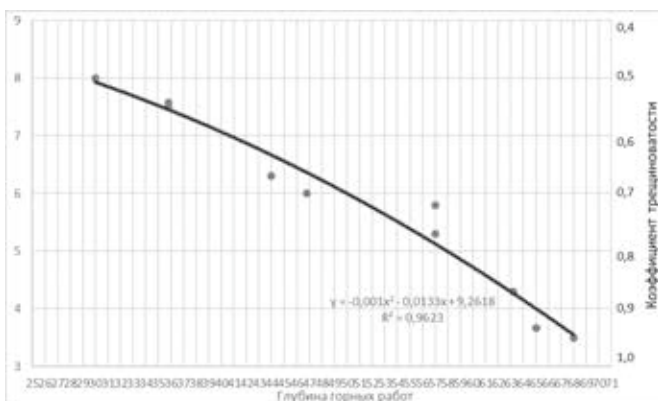
| Показатель                                               | Значение |
|----------------------------------------------------------|----------|
| Объемный вес руды $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>            | 2,3      |
| Коэффициент Пуассона $\nu$                               | 0,3      |
| Модуль Юнга $E$ , $\cdot 10^6$ Па                        | 4,5      |
| Предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа | 25       |
| Предел прочности на растяжение $\sigma_r$ , МПа          | 8        |
| Коэффициент пластичности $K_{пл}$                        | 2,1      |

Таблица 3 / Table 3

**Изменение коэффициента трещиноватости от величины трещин / Change of fracture coefficient from crack size**

| Величина трещиноватости, % | Коэффициент трещиноватости |
|----------------------------|----------------------------|
| До 5                       | 0,95                       |
| До 10                      | 0,75                       |
| До 15                      | 0,6                        |
| До 20                      | 0,45                       |

На основании проведенных исследований гипсового массива на Южном участке установлены его структурные изменения при ведении горных работ на разной глубине (рис. 2).



**Рис. 2. Зависимость коэффициента структурного ослабления горных пород от глубины горных работ / Fig. 2. Dependence of the depth of mining operations on the coefficient of structural weakening of rocks**

Из представленной зависимости следует, что с увеличением глубины горных работ массив гипса слабо насыщен трещинами и карстами. С уменьшением глубины работ возрастает структурное ослабление массива.

На графике (рис. 2) левая ее часть, представлена целыми числами для выбора зависимости, а правая – коэффициентом трещиноватости, показывающим предельные области для его учета. При залегании в кровле пласта гипса доломитов или известняка расчет предохранительного целика производится по контакту пород с учетом продольных сил.

**Расчет предохранительного целика**

Расчет нагрузки по теории Турнера – Шемякова [3] основан на допущении, что давление на потолочину и все цели-

ки одинаково и равно полному весу столба пород до земной поверхности, то есть прочность их рассчитывается на бесконечно большой срок службы. На основании теории свода естественного равновесия М. М. Протодяконов, П. М. Цимбаревич, В. Д. Слесарев, В. И. Голик, Ю. М. Либерман, В. Р. Рахимов и другие ученые определяли величину давления в кровле и на целики.

Большое внимание данной проблеме было уделено в работах ВНИМИ [3]. Эта теория предполагает, что нагрузка на междуканерные целики составляет лишь часть веса столба налегающих пород. Согласно исследованиям В. Р. Рахимова [4], который рассмотрел модель непосредственной кровли в виде упругой балки, прогнувшейся под действием пригрузки и собственного веса, в кровле возникают не только сжимающие напряжения, но и изгибающие моменты продольного изгиба.

Автор предположил, что эти напряжения вызываются приложенными из бесконечности продольными силами:

$$P = \lambda \gamma \sum_{n=1}^n H + h + h_1, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент бокового давления (соотношение между горизонтальными и вертикальными напряжениями);

$\gamma$  – объемный вес налегающих пород, т/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина залегания (ведения горных работ), м;

$h$  – высота потолочины, м;

$h_1$  – мощность водного горизонта.

Основываясь на предположениях В. Р. Рахимова, А. А. Карпиков предложил формулу для определения предельного пролета кровли [4, 5], при котором происходит потеря устойчивости потолочины для очистных выработок

$$b_{пред} = 1,8 h \sqrt{\frac{E}{(\lambda - 1)\gamma H}}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга, МПа.

В. Д. Слесарев [5, 6] предложил для предельного определения пролета обнажения формулу, не учитывающую влияние вертикального давления,

$$b_{пред} = \sqrt{\frac{2\sigma_p h}{\sigma_{гор}}} \quad (3)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности на растяжение, т/м<sup>2</sup>;

$\sigma_{гор}$  – влияние горизонтального давления, т/м<sup>2</sup>.

Преобразовав данное тождество, получим формулу для вычисления минимальной мощности потолочины в кровле очистных выработок

$$h_{min} = \frac{0,62 \sigma_p H(\lambda - 1)}{E}. \quad (4)$$

А.Б. Макаров [7, 8] предлагает рассчитывать  $\lambda$  из выражения

$$\lambda = \frac{\sum \sigma_{гор}}{2 \sigma_{верт}}. \quad (5)$$

$$\sigma_{гор} = \mu \lambda H, \quad (6)$$

где  $\mu$  – коэффициент бокового распора, который зависит от коэффициента Пуассона;

$\sigma_{верт}$  – влияние вертикального давления, т/м<sup>2</sup>.

В пластически деформирующихся породах

$$\mu = tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Как видно из (1), мощность потолочины (защитного слоя) определяется физико-механическими свойствами горных пород и величиной давления налегающих пород (глубиной ведения работ) [9, 10].

При наличии трещиноватости или карстов в защитном слое в кровле выработок необходимо учитывать коэффициенты запаса прочности и трещиноватости, который можно принять по таблице 3.

$$h_{зк} = \frac{0,62n\sigma_p H (\lambda - 1)}{K_T E} \quad (8)$$

При планировании показателей извлечения по выемочной единице (блок, панель) необходимо учитывать потери по всем источникам их формирования. Однако во избежание получения завышенных показателей потерь необходимо рассматривать каждый вид индивидуально и рассчитывать нормативные значения [11, 12].

В потолочине камер по технологическим соображениям возможно оставление гипсового целика либо полная отработка гипсового пласта с выходом под покрывающие известняки [13, 14].

Установленная на участке Z минимальная мощность пород, оставляемых в потолочине по фактору устойчивости, определяем по формуле

$$h_1 = 0,625 \frac{\gamma_1 l^2 n}{\sigma_{сж} \cdot k_c} + 0,39 \frac{\gamma_1^2 l^4 n^2}{\sigma_{сж}^2 \cdot k_c^2} + \frac{l^2 \gamma n}{2,4 \sigma_{сж} \cdot k_c \cdot f} \quad (9)$$

где  $n$  – коэффициент запаса прочности;

$l$  – длина пролета камеры (м);

$\gamma$  – объемный вес налегающих пород (т/м<sup>3</sup>);

$\gamma_1$  – объемный вес пород, оставляемых в потолочине (т/м<sup>3</sup>);

$\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие пород, оставляемых в потолочине (т/м<sup>2</sup>);

$k_c$  – коэффициент структурного ослабления;

$f$  – коэффициент крепости по М. М. Протоцкаянову.

После проведения натурных исследований, связанных с расчетом потолочин, авторами предложена формула

$$h_n = L \sqrt{\frac{0,01 \cdot n \cdot \gamma \cdot H}{\sigma_p}} \quad (10)$$

где 0,01 – постоянная величина, применяемая к расчету;

$n$  – коэффициент (для широких камер более 8 м принимаем 0,2–0,25);

$\sigma_p$  – предел прочности на растяжение (гипс 2,5 МПа = 250 т/м<sup>2</sup>).

При расчетах под водоносный горизонт закладываем запас прочности 5, тогда

$$\frac{2,5}{5} = 0,5 \text{ МПа} = 50 \text{ т/м}^2. \quad (11)$$

Тогда с учетом веса потолочины водного пласта и налегающей толщи при глубине разработки 50 м формула примет вид

$$h_n = 10 \cdot \sqrt{\frac{0,01 \cdot 0,25 \cdot 2,3 \cdot 50}{50}} = 0,75 \text{ м}, \quad (12)$$

принимаем 1 м при массивном гипсе. При глубине 100 м

$$h_n = 10 \cdot \sqrt{\frac{0,01 \cdot 0,25 \cdot 2,3 \cdot 100}{50}} = 1,0 \text{ м}. \quad (13)$$

При изменении глубины разработки пластов V–VII толщина безопасной потолочины должна быть не менее 1,0 м. При изменении толщины потолочины необходимо вводить коэффициенты запаса.

Коэффициент запаса прочности при оставлении в потолочине слоя покрывающих пород проверить по формуле

$$n = \frac{2,4 \cdot \sigma_{сж} \cdot k_c h_1}{l^2 \left( \frac{l \gamma}{h_1 f} + 3 \gamma_1 \right)}. \quad (14)$$

Расчеты показали, что для участка Z Бебяевского месторождения рекомендуется принимать безопасную величину потолочины не менее 1 м при залегании пласта гипса без трещиноватости. Если появляются трещины и каверны, то следует величину давления рассчитать в соответствии с установленными ранее коэффициентами  $K_c$ . Внедрение методических указаний по расчету потолочины приведено в техническом проекте [15, 16].

Приведенные расчеты оптимальной безопасной толщины потолочины показывают, что фактически оставляемые предохранительные целики в панелях 6, 7 и 8 составили 1,7–2,2 м.

Проведенные испытания в 2024–2025 годах в блоках (Ю-6, Ю-7, 8-9) по формированию потолочин, рассчитанных по приведенным формулам, показали их безопасность и устойчивость (в массиве без трещиноватости) на участке Z.

Данное предложение позволило сократить потери полезного ископаемого (гипса) в панелях Z-1, Z-2, Z-3.

При  $h_n = 1,7$  м (проектные),  $h_\phi = 1,0$  м (предлагаемые), расчет потерь в панели  $L = 100$  м (длиной),  $b = 10$  м (шириной),  $\gamma = 2,3$  т/м<sup>3</sup> (удельный вес).

Всего запасов гипса в потолочине

$$h_n \cdot L \cdot b \cdot \gamma = 1,7 \cdot 100 \cdot 10 \cdot 2,3 = 3\,910 \text{ м}^3. \quad (15)$$

При изменении

$$h_n \cdot L \cdot b \cdot \gamma = 1,0 \cdot 100 \cdot 10 \cdot 2,3 = 2\,300 \text{ м}^3 \quad (16)$$

$$\Delta\Pi = 3\,910 - 2\,300 = 1\,610 \text{ м}^3. \quad (17)$$

К отработке на участке Z планируется 10 панелей.

Таким образом, сокращение потерь гипса, оставляемых в потолочине камер, может сократиться до 41 %, что указывает на рациональное использование недр.

Приведем расчет коэффициента запаса для опорных целиков

$$n = \frac{P_{сж}}{P_\phi}, \quad (18)$$

где  $P_{сж}$  – предел прочности на сжатие в образце (Г-25 – 25 МПа), умноженный на коэффициент структурного ослабления (0,5–0,7);

$P_\phi$  – фактическое напряжение в целике, оно рассчитывается по формуле

$$P_{\Phi} = \frac{\gamma \cdot H}{1 - S_{\text{изв}}}, \quad (19)$$

где  $\gamma$  – плотность,

$H$  – глубина разработки,

$S_{\text{изв}}$  = коэффициент извлечения (доля извлеченной площади).

Давление нетронутого массива составляет 2,4 МПа. Если извлекаем 70 % ( $S_{\text{изв}} = 0,7$ ), то нагрузка на оставленные целики возрастет до  $\frac{2,4}{0,3} = 8$  МПа. Прочность массива гипса (Г–25) составляет 25 МПа, то тогда наш запас прочности составит  $\frac{25}{8} = 3,12$ . Это допустимый предел при величине трещиноватости массива, не превышающего 10 %.

### Заключение

1. На основании обработки кернов скважин и шламов шпуров горных выработок установлено категорирование участка Z по карстовым полостям и трещиноватости.
2. Предложена методика расчета устойчивости потолоч-

ны камер на основании фактических физико-механических свойств разрабатываемого гипса.

3. Установлено оптимальное значение предохранительной потолочины толщиной 1,0 м. Оптимизация толщины потолочины в зависимости от разрабатываемого массива и сохранением дневной поверхности в одной панели составит 1 610 м<sup>3</sup>, что позволит более рационально использовать недра.

### Выводы

1. В работе исследована роль защитной пачки гипса, оставляемой в потолочине камер при камерно-столбовой системе разработки нерудных месторождений.
2. Проведены исследования по установлению коэффициентов структурного ослабления гипсового массива на Бебяевском месторождении, которые использованы в предложенной методике расчета предохранительных целиков с учетом физико-механических свойств пород и глубины горных работ.
3. Данная методика может быть рекомендована для обработки обводненных месторождений гипса, залегающих на глубине до 250 м.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Жараспаев М.А., Мустафин М.Г. Определение параметров повторной разработки рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019; 6: 3-15. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-6-16-3-15>.
2. Чегодамов Д.Ю., Бугина В.М. Особенности Новомосковского гипсового месторождения: реконструкция условий формирования на основе анализа распределения примесей и характера изопачит. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2026; 1 (163): 2-3. Chemoanov D.Yu., Bugina V.M. Features of the Novomoskovsk Gypsum Deposit: Reconstruction of Formation Conditions Based on the Analysis of Impurities Distribution and the Nature of Isopachites. *International Research Journal*. 2026; 1 (163): 2-3. (In Russ.).
3. Курчин Г.С., Волков Е.П., Зайцева Е.В. и др. Определение оптимальных параметров междукамерных целиков для экологически безопасной технологии добычи нерудных строительных материалов. *Современные проблемы науки и образования*. 2013; 5: 56-57. Kurchin G.S., Volkov E.P., Zaitseva E.V., et al. Determination of optimal parameters of inter-chamber pillars for environmentally safe technology of extraction of non-metallic building materials. *Modern problems of science and education*. 2013; 5: 56-57. (In Russ.).
4. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Майоров Е.С. К вопросу определения нормативных величин потерь при добыче ангидрита камерно-столбовой системой разработки. *Вестник МГТУ*. 2010; 1: 10-13. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Mayorov E.S. On the issue of determining the standard values of losses during the extraction of anhydrite by a chamber-column mining system. *Bulletin of MSTU*. 2010; 1: 10-13. (In Russ.).
5. Догузов Б.Г., Дулин А.Н., Дулин А.А. Оценка систем разработки при изменении производственной мощности предприятия. *Интеллектуальная инженерная экономика: современные вызовы ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск*, 2025: 331-333. Doguzov B.G., Dulin A.N., Dulin A.A. Evaluation of development systems when the production capacity of an enterprise changes. *Intelligent Engineering Economics: modern Challenges of the M.I. Platov Moscow State Pedagogical University (NPI)*. Novocherkassk, 2025: 331-333. (In Russ.).
6. Криницын Р.В., Худяков С.В., Давиденко А.А. и др. Исследование геомеханических условий массива горных пород олёкминского гипсового месторождения с целью обоснования параметров геотехнологии. *Вестник ИрГТУ*. 2015; 4 (99): 2-12. Krinitsyn R.V., Khudiyakov S.V., Davidenko A.A., et al. Study of the geomechanical conditions of the rock massif of the Olekminskoye gypsum deposit in order to substantiate the parameters of geotechnology. *Bulletin of IrSTU*. 2015; 4 (99): 2-12. (In Russ.).
7. Добмайер Э. Разработка и внедрение эффективных вариантов технологии подземной добычи гипсов на Новомосковском месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1999; 4: 7. Dobmayer E. Development and Implementation of Effective Options for Underground Gypsum Mining at the Novomoskovsk Deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1999; 4: 7. (In Russ.).
8. Liya Zhang, Pengfei Gao, Zhengzheng Gan, et al. Surface subsidence monitoring of mining areas in human province based on Sentinel-1A and DS-InSAR. *Sensors (Basel)*. 2023; 23 (19): 8146. <https://doi.org/10.3390/s23198146>.
9. Упорова Н.С., Леонова Л.В., Гуляева Т.Я. Фазообразование в гипсе при высоких температурах. *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. 2024; 14: 9. Uporova N.S., Leonova L.V., Gulyaeva T. Ya. Phase formation in gypsum at high temperatures. *Minerals: structure, properties, research methods*. 2024; 14: 9. (In Russ.).
10. Wang J., Fan K., Du J., et al. Effect of organosilicon modified epoxy resin on slurry viscosity and mechanical properties of polyurethane grouting materials. *Construction and Building Materials*. 2023; 387: 131585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131585>.
11. Жабин А.В., Кобылина О.Н. Морфологические особенности частиц гипса в зависимости от гидродинамических обстановок их образования. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023; 4: 129-133. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/129-133>. Zhabin A.V., Kobylina O.N. Morphological features of gypsum particles depending on the hydrodynamic conditions of their formation. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*. 2023; 4: 129-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/129-133>.

12. Юн А.Б., Макаров А.Б., Мосякин Д.В. и др. Нагруженность междукammerных целиков при повторной разработке. *Горный журнал*. 2002; 5: 24-26.  
Yun A.B., Makarov A.B., Mosyakin D.V., Karpikov A.A., and Charkovsky K. I. The Load on Inter-Chamber Backs in Re-Development. *Mining Journal*. 2002; 5: 24-26. (In Russ.).
13. Панчуков Н.П., Захаров В.Н., Подольский В.А. Исследование параметров камерно- столбовой системы подземной разработки месторождений гипса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012; 5: 41-44.  
Panchukov N.P., Zakharov V.N., Podolsky V.A. Investigation of the parameters of the chamber-pillar system of underground mining of gypsum deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012; 5: 41-44. (In Russ.).
14. Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using Sentinel-1 data: The case study of rydułtowy mine in Poland. *Remote Sensing*. 2020; 12 (2): 242. <https://doi.org/10.3390/rs12020242>.
15. Jahanmiri S., Noorian-Bidgoli M. Land subsidence prediction in coal mining using machine learning models and optimization techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024; 31 (22): 31942-31966. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33300-2>.
16. Dirgėlienė N., Kordušas V. Stabilization of soil using polyurethane resin injection technology / International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques. *Cham: Springer Nature Switzerland*, 2023: 605-611. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0\\_62](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_62)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Николаевич Дулин –**

д-р техн. наук, профессор кафедры ПИМ Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

**Борис Гивиевич Догузov –**

аспирант кафедры горного дела Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: doguzovbg@mail.ru

#### Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

#### Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.04.2026

Поступила после рецензирования: 17.06.26

Принята к публикации: 22.06.2026

#### ABOUT THE AUTHORS

**Aleksandr N. Dulin –**

Dr. Sci. (Eng.), professor at the Department of Industrial Innovation Management at the South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

**Boris G. Doguzov –**

Postgraduate Student at the Department of Mining at the South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation; e-mail: doguzovbg@mail.ru

#### Contribution:

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

#### Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

#### Article info

Received: 24.04.2026

Revised: 17.06.26

Accepted: 22.06.2026

## Параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва

Н. Ю. Трошков✉

Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. Межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация

✉ [troshkoff1973@mail.ru](mailto:troshkoff1973@mail.ru)

**Резюме.** Определены параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва. Предложено расстояние между пластовыми дегазационными скважинами находить исходя из условия снижения газоносности до безопасных по выбросам пределов и с учетом фильтрационных свойств угля. Приведены зависимости, позволяющие расчетным путем определять коэффициенты газопроницаемости на основании природных факторов для нахождения суммарного количества выделившегося метана в дегазационную скважину. Изложены результаты исследований по выявлению связи между давлением нагнетаемой жидкости, свойствами угля и условиями залегания пласта. Установлено, что давление жидкости, нагнетаемой в пласт, зависит от физических свойств угля, глубины и угла падения пласта, а не только от глубины залегания. Указывается, что приближенно физические свойства пласта могут быть учтены осредненным значением коэффициента Пуассона и выходом летучих веществ.

**Ключевые слова:** дегазация, выбросоопасный пласт, гидроразрыв, дегазационная скважина, газоносность, газопроницаемость, метан, физические свойства угля

**Для цитирования:** Трошков Н.Ю. Параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 45-49. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-45-49>.

## Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing

N. Yu. Troshkov ✉

Kemerovo Branch of JSC «Research institute of rock mechanics and mine survey – Inter-branch research center «VNIMI», Kemerovo, Russian Federation

✉ [troshkoff1973@mail.ru](mailto:troshkoff1973@mail.ru)

**Abstract.** Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing are determined. It is proposed that the distance between seam drainage boreholes be determined based on the condition of reducing gas content to safe emission limits and taking into account the filtration properties of the coal. Dependencies are provided for calculating gas permeability coefficients depending on natural factors to determine the total amount of methane released into the drainage borehole. The results of studies on the relationship between injected fluid pressure, coal properties, and seam bedding conditions are presented. It has been established that the pressure of fluid injected into a seam depends on the physical properties of the coal, the depth, and the dip angle of the seam, and not just the burial depth. It is noted that the physical properties of the seam can be approximately accounted for by the average value of Poisson's ratio and the yield of volatile substances.

**Keywords:** degassing, outburst-prone seam, hydraulic fracturing, degassing well, gas content, gas permeability, methane, physical properties of coal

**For citation:** Troshkov N.Yu. Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 45-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-45-49>.

## Введение

Одним из основных способов региональной профилактической обработки выбросоопасных угольных пластов в Кузнецком бассейне является предварительная дегазация угольного массива пластовыми скважинами, пробуренными из горных выработок. В условиях значительного увеличения нагрузки на очистной забой и повышения темпов проведения подготовительных выработок требуемая эффективность дегазации угольных пластов должна составлять 70–80 % [1–4].

Высокая эффективность дегазации необходима также для предотвращения внезапных выбросов угля и газа в очистных и подготовительных выработках. При низкой природной газопроницаемости угольного пласта и снижении ее с увеличением глубины горных работ необходимо уменьшать расстояние между дегазационными скважинами или увеличивать срок дегазации, что является нецелесообразным по технико-экономическим показателям. Поэтому все более широкое применение находят искусственные методы интенсификации газовыделения в пластовые скважины.

Эффективным методом интенсификации газовыделения является гидравлический разрыв пласта из подземных выработок с последующей дегазацией угольного массива пластовыми скважинами, пробуренными в зоне гидроразрыва [5, 6]. Эффективность дегазации разрабатываемых пластов с предварительным гидроразрывом составляет 50–60 %, что свидетельствует о значительном снижении газоносности угля и, следовательно, выбросоопасности пласта [7, 8].

Проведенными на выбросоопасных пластах исследованиями установлено, что средняя интенсивность газоотдачи дегазационных скважин, пробуренных в зоне гидроразрыва, в 2–3 раза выше, чем газоотдача скважин, расположенных вне зоны гидроразрыва. Интенсификация процесса дегазации склонных к внезапным выбросам угольных пластов рекомендуется при газопроницаемости менее 0,01 мД и при невыдержанной гипсометрии пласта, а также с целью сокращения сроков дегазации и улучшения безопасных условий на пластах с более высокой газопроницаемостью. Пластовые дегазационные скважины бурятся после осуществления гидроразрыва угольного пласта. Их длина должна приниматься с таким расчетом, чтобы будущие подготовительные выработки соседнего столба или нижележащего подэтажа находились в зоне предварительной дегазации. Расстояние между пластовыми дегазационными скважинами находится исходя из условия снижения газоносности угля до безопасных по выбросам пределов.

**Цель исследований:** определить расчетные параметры давлений, наблюдаемых при различных режимах и схемах нагнетания воды в пласт при гидроразрыве на подготовительных и выемочных участках угольных шахт Кузбасса, отработывающих угольные пласты опасные по выбросам.

## Методы и результаты исследований

Согласно руководству по дегазации угольных шахт [9], расстояние между параллельно-одиночными скважинами в блоке определяется по формуле

$$R_i = \frac{k_b z l_c q_0 b t}{H m \gamma q_{пл} k_{дег,пл}}, \quad (1)$$

где  $k_b$  – коэффициент влияния разрежения для условий Кузнецкого бассейна, принимается по данным [9];

$z$  – коэффициент, характеризующий неравномерность газовыделения из пласта в отдельные скважины,  $z = 0.75$ ;

$l_c$  – полезная длина скважины, м;

$q_0$  – значение начального удельного метановыделения, м<sup>3</sup>/м сут;

$b$  – коэффициент, учитывающий изменение метановыделения из скважин во времени;

$t$  – продолжительность дренирования пласта скважинами, сут;

$H$  – высота этажа (подэтажа), дегазируемая скважинами, м;

$\gamma$  – объемный вес угля, т/м<sup>3</sup>;

$m$  – мощность пласта, м;

$q_{пл}$  – метанообильность, обусловленная метановыделением из разрабатываемого пласта, м<sup>3</sup>/т;

$k_{дег,пл}$  – требуемый коэффициент эффективности дегазации пласта.

Числитель формулы (1) представляет собой объем извлеченного газа за время  $t$ . Требуемая степень дегазации пласта с точки зрения предотвращения выбросов угля и газа определяется отношением объема газа, который необходимо извлечь за определенный период, ко всему объему содержащегося газа на данном участке:

$$K_d^B = \frac{k_b z l_c q_0 b t}{L m \gamma R_b x}, \quad (2)$$

где  $K_d^B$  – степень дегазации выбросоопасного пласта;

$L$  – ширина участка, околнуренного выработками (высота этажа, подэтажа, ширина столба), м;

$R_b$  – расстояние между дегазационными скважинами, пробуренными по выбросоопасному пласту, м;

$x$  – природная газоносность угля, м<sup>3</sup>/т.

Из уравнения (2) расстояние между пластовыми скважинами на выбросоопасных пластах определяется следующим выражением

$$R_b = \frac{k_b z l_c q_0 b t}{L m \gamma x q_0} \text{ м.} \quad (3)$$

Необходимая степень дегазации угольного массива, исключаяющая внезапные выбросы угля и газа, находится по формуле [10]

$$K_d^B = \frac{x - x_\sigma}{x}, \quad (4)$$

где  $x_\sigma$  – безопасное значение газоносности угля, м<sup>3</sup>/т, зависит от прочностных и газодинамических свойств угля

$$x_\sigma = \frac{cA}{1+b_r A} - \frac{100 - A^C}{100} \frac{M^3}{T}, \quad (5)$$

здесь  $c$ ,  $b_r$  – коэффициенты уравнения, характеризующие рост природной газоносности шахтопласта с глубиной; значения их устанавливаются по результатам газового опробования в процессе геологоразведочных работ, м<sup>2</sup>/т, м<sup>–1</sup>;

$A$  – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента крепости  $f$  и начальной скорости газоотдачи угля  $\Delta P$  на величину  $x_\sigma$  [10];

$A^C$  – зольность угля, %.

С учетом формулы расстояние между дегазационными скважинами, пробуренными по выбросоопасному пласту, рассчитывается по выражению

$$R_B = \frac{k_{Bz} q_0 b t}{L m \gamma (x - x_0)} \text{ м.} \quad (6)$$

Расстояние между пластовыми скважинами, пробуренными в зоне гидроразрыва, определяется по формуле

$$R_{B.Г} = \frac{k_{Bz} q_0 b t k_{и}}{L m \gamma (x - x_0)}, \quad (7)$$

где  $k_{и}$  – коэффициент, учитывающий интенсификацию метановыделения из пластовых скважин, пробуренных в зоне гидроразрыва.

В уравнениях (6) и (7) произведение  $q_0 b t$  представляет суммарное метановыделение в скважину за период  $t$ , то есть

$$q_0 b t = Q_t \frac{\text{м}^3}{\text{м}}. \quad (8)$$

Известно [11], что удельное метановыделение из дегазационных скважин  $q_t$  на данный период определяется уравнением

$$q_t = q_0 e^{-\beta t} \frac{\text{м}^3}{\text{м} \cdot \text{сут.}}, \quad (9)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов;

$\beta$  – коэффициент, характеризующий темп снижения газоразделения в скважины, сут.

Темп снижения газоразделения в одиночные скважины зависит от фильтрационных свойств угольного массива.

Нами определена эта зависимость для условий Кузнецкого бассейна:

$$\beta = 1,3 \cdot 10^{-5} (\lg K + 9,8), \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент газопоницаемости, мД.

Коэффициент газопоницаемости угля на дегазируемом участке угольного пласта находится в зависимости от глубины залегания пласта, газового давления, влажности и вещественно-петрографического состава угля [12].

Влажность  $\omega$  и вещественно-петрографический состав угля на одном шахтопласте могут колебаться в значительных пределах. Поэтому для более точного расчета коэффициента газопоницаемости необходимо учитывать влажность и вещественно-петрографический состав угля исследуемого участка угольного пласта.

С учетом влажности коэффициент газопоницаемости рассчитывается по формуле

$$K = \bar{K} \frac{d' + c v t^2}{d} \text{ мД,} \quad (11)$$

С учетом вещественно-петрографического состава угля, то есть процентного содержания витринита, в угле коэффициент газопоницаемости определяется по формуле

$$K = \bar{K} \frac{d' + c v t^2}{d} \text{ мД,} \quad (12)$$

где  $\bar{K}$  – среднее значение коэффициента газопоницаемости, мД;

$A, B, C, d', c, d$  – коэффициенты, зависящие от структурных особенностей углей.

Исходя из уравнений (11) и (12), средние значения коэффициентов газопоницаемости определяются по формуле

$$K = \bar{K} \frac{(d' + c v t^2)(A - B \omega)}{(A + \omega) E} \text{ мД,} \quad (13)$$

где  $E$  – эмпирический коэффициент, представляющий собой произведение коэффициентов  $d$  и  $C$  из уравнений (11) и (12).

Подставляя значения коэффициентов газопоницаемости в формулу (10), находим коэффициенты, характеризующие темп снижения газоразделения в дегазационные скважины во времени.

Проинтегрировав выражение (9), получим суммарное количество выделившегося метана в скважину за время

$$Q_t = \frac{q_0 \left[ 1 - e^{-1,3 \cdot 10^{-5} (\lg K + 9,8) t} \right]}{1,3 \cdot 10^{-5} (\lg K + 9,8)} \frac{\text{м}^3}{\text{м}}. \quad (14)$$

Таким образом, расстояние между дегазационными скважинами, пробуренными в зоне гидроразрыва на выбросоопасных пластах, в зависимости от природной газоносности угля, безопасного по выбросам значения газоносности, продолжительности дегазации и фильтрационных свойств угольного пласта может быть определено по уравнению

$$R_{B.Г} = \frac{k_{Bz} Q_t k_{и}}{L m \gamma (x - x_0)} \text{ м.} \quad (15)$$

Коэффициент газопоницаемости угольных пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа, для определения суммарного количества выделившегося метана в скважину рассчитывается по формуле (13).

При гидроразрыве пласта возникает необходимость интерпретации многочисленных исследований и результатов многолетнего опыта предварительного увлажнения угольных пластов применительно к новым режимам нагнетания воды в пласты. При этом установлено, что фильтрация воды в угольных пластах происходит по системе редко расположенных, примерно перпендикулярных плоскости пласта (вертикальных) трещин и по послойным (горизонтальным) трещинам. Указанные трещины можно назвать гидропроводными.

При нагнетании воды в пласт через шпур, пробуренный из очистного забоя, пересечение шпура с гидропроводной трещиной маловероятно. Причем в случае их пересечения вода быстро проникает в забой, и шпур бракуется. Кроме того, в этом случае влиянием горного давления на параметры нагнетания можно пренебречь. Следовательно, давление нагнетания воды в пласт, особенно его максимальное значение, будет определяться давлением расчленения послойных трещин.

Математическая обработка замеров показала, что давление нагнетания с достаточной для практики точностью может быть определено из выражения

$$P_{ш} = 0,03 \cdot (0,27 - V^r)^2 + 6,0, \quad (16)$$

где  $P_{ш}$  – давление расчленения послойных трещин, МПа;  
 $V^r$  – выход летучих веществ, %.

При нагнетании воды через длинные скважины, пробуриваемые в плоскости пласта, могут иметь место три случая: скважина пересекла «вертикальную» или «горизонтальную», не имеющую близлежащих мест спайности трещину, и сква-

жина не имеет пересечений с гидропроводными трещинами.

В первом случае давление нагнетания должно быть достаточным для раскрытия «вертикальной» трещины, сжатой горным давлением, величина которого с учетом осредненной величины коэффициента Пуассона определится из выражения

$$P_v = (25\sin\alpha + 11\cos\alpha) \cdot H \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где  $P_v$  – давление раскрытия «вертикальной» трещины, МПа;  
 $\alpha$  – угол падения пласта, град;  
 $H$  – глубина залегания пласта, м.

Во втором случае давление нагнетания должно раскрыть «горизонтальную» трещину, сжатую горным давлением, определяемым из выражения

$$P_r = (25\cos\alpha + 11\sin\alpha) \cdot H \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

где  $P_r$  – давление раскрытия «горизонтальной» трещины, МПа.

В третьем случае давление нагнетания должно быть равно наибольшему давлению, определенному по одной из вышеприведенных формул.

Следовательно, давление гидроразрыва (гидорасчленения) в различные моменты нагнетания может принимать значения, определяемые формулами (16), (17), (18), а при больших скоростях нагнетания (более 1 л/с), когда требуется не только раскрытие, но расширение трещин, может достигать значений

$$P_{гр\max} = P_r + P_{ш}, \quad (19)$$

где  $P_{гр\max}$  – наибольшее давление гидроразрыва, МПа.

Следует отметить, что скорость закачки воды в скважину, по данным работ [13–15], изменяется в пределах 6–70 л/с.

Приведенные выше формулы пригодны для ориентиро-

вочных расчетов давлений, наблюдаемых при различных режимах и схемах нагнетания воды в пласт.

### Заключение

1. Проведенными на выбросоопасных пластах исследованиями установлено, что средняя интенсивность газоотдачи дегазационных скважин, пробуренных в зоне гидроразрыва, в 2–3 раза выше, чем газоотдача скважин, расположенных вне зоны гидроразрыва. Эффективность дегазации при этом достигает 50–60 %.

2. Интенсификация процесса дегазации склонных к внезапным выбросам угольных пластов рекомендуется при газопроницаемости менее 0,01 мД и при невыдержанной гипсометрии пласта, а также с целью сокращения сроков дегазации и улучшения безопасных условий на пластах с более высокой газопроницаемостью.

3. Расстояние между пластовыми дегазационными скважинами следует определять исходя из условия снижения газозонности до безопасных по выбросам пределов и с учетом фльтрационных свойств угля.

4. Давление гидроразрыва зависит от физических свойств угля (выхода летучих веществ, коэффициента Пуассона), глубины залегания и угла падения пласта.

5. Для нахождения общего количества выделившегося метана в дегазационную скважину получены зависимости, позволяющие определять коэффициенты газопроницаемости в зависимости от природных факторов.

6. Полученные расчетные зависимости позволяют определять давление при различных режимах и схемах нагнетания воды в пласт при его гидроразрыве.

### Выводы

1. В статье приведены результаты исследований, направленных на определение расчетных параметров дегазации и гидроразрыва на выбросоопасных угольных пластах Кузбасса.

2. Результаты исследований могут быть использованы для проектирования вентиляции и дегазации на выемочных и подготовительных участках шахт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сергеев И.В. Исследование газообильности шахт и способов ее снижения. *Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского*. Москва, 1970: 75. Sergeyev I.V. Investigation of gas abundance in mines and ways to reduce it. *Scientific reports of the A.A. Skochinsky IGD*. Moscow, 1970: 75. (In Russ.).
2. Слестунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В. и др. Разработка и совершенствование технологий пластовой дегазации для эффективной и безопасной отработки угольных пластов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; 11 (СП 49): 13–22. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22>.  
 Slastunov S.V., Yutyaev E.P., Mazanik E.V., et al. Development and improvement of reservoir degassing technologies for efficient and safe mining of coal seams. *Mining information and analytical bulletin*. 2018; 11 (SP 49): 13–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22>.
3. Золотых С.С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса. *Горная промышленность*. 2019; 5: 18–22. <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-05-18-22>.  
 Zolotykh S.S. Early degassing of coal seams as a factor in improving safety at Kuzbass mines. *Mining Industry*. 2019; 5: 18–22. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-05-18-22>.
4. Pan Y., Song Y., Luo H., et al. Coalbursts in China: Theory, practice and management. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024; 14: 1–25.
5. Преображенская Е.И., Талапкерова А.Ш., Садчиков В.А. Гидроразрыв угольного массива из подземных скважин. *Безопасность труда в промышленности*. 1976; 12: 26–28.  
 Preobrazhenskaya Ye.I., Talapkerov A.Sh., Sadchikov V.A. Hydraulic fracturing of the coal massif from underground wells. *Occupational safety in industry*. 1976; 12: 26–28. (In Russ.).
6. Слестунов С.В., Понизов А.В., Садов А.П. и др. Гидрорасчленение угольных пластов для их эффективной дегазационной подготовки через подземные скважины. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 6: 15–25. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-15-25>.

- Slastunov S.V., Ponizov A.V., Sadov A.P., et al. Hydraulic fracturing of coal seams for their effective degassing treatment through underground wells. *Mining information and analytical bulletin*. 220; 6: 15-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-15-25>.
7. Xinhua W., Tao Z., Yufei L., et al. Mechanism of Coal Seam Permeability Enhancement and Gas Outburst Prevention under Hydraulic Fracturing Technology. *Geofluids*. 2022; 7151851: 9. <https://doi.org/10.1155/2022/7151851>.
  8. Li X., Zhou W., Hao S., et al. Prevention and Control of Coal and Gas Outburst by Directional Hydraulic Fracturing through Seams and Its Application. *ACS Omega*. 2023; 8: 41. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04737>.
  9. Руководство по дегазации угольных шахт. Москва, 1975: 189.  
Guidelines for coal mine degassing. Moscow, 1975: 189. (In Russ.).
  10. Фоминых Е.И. Оценка степени дегазации выбросоопасных пластов. *Уголь*. 1976; 10: 43-48.  
Fominykh E.I. Assessment of the degree of degassing of explosive formations. *Coal*. 1976; 10: 43-48. (In Russ.).
  11. Сирош М.К. Исследование режима и параметров предварительной дегазации разрабатываемых угольных пластов Кузбасса. Кемерово, 1974: 22.  
Sirosh M.K. Investigation of the regime and parameters of preliminary degassing of the developed coal seams of Kuzbass. Kemerovo, 1974: 22. (In Russ.).
  12. Талапкеров А.Ш., Калякина Т.Н. Влияние природных факторов на газопроницаемость угольных пластов. Эффективные способы дегазации угольных пластов. *Труды ВостНИИ*. Кемерово, 1978: 114-119.  
Talapkero A.Sh., Kalyakina T.N. The influence of natural factors on the gas permeability of coal seams. Effective methods of degassing coal seams. *Proceedings of VostNI*. Kemerovo, 1978: 114-119. (In Russ.).
  13. Ножкин Н.В., Аниканов В.М. Гидравлическое расчленение пластов через скважины с поверхности. Москва, 1978: 38.  
Nozhkin N.V., Anikanov V.M. Hydraulic separation of formations through boreholes from the surface. Moscow, 1978: 38. (In Russ.).
  14. Бирюков Ю.М., Садчиков В.А., Садчиков А.В. Управление газовыделением на горных отводах ликвидированных угольных шахт. Калининград, 2008: 186.  
Biryukov Yu.M., Sadchikov V.A., Sadchikov A.V. Gas emission management at mining branches of liquidated coal mines. Kaliningrad, 2008: 186. (In Russ.).
  15. Wang C., Cao A., Xiang Z., et al. Numerical investigation of two typical outbursts in development headings: A case study in a Chinese coalfield. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025; 17 (5): 2682-2694. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.028>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Николай Юрьевич Трошков –**

зам. директора Кемеровского филиала АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. Межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация; troshkoff1973@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0672-6128>

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 10.04.2026

Поступила после рецензирования: 18.05.2026

Принята к публикации: 03.06.2026

## ABOUT THE AUTHOR

**Nikolay Yu. Troshkov –**

Deputy Director Kemerovo Branch of the “Research institute of rock mechanics and mine survey – Inter-branch research center “VNIMI”, Kemerovo, Russian Federation; troshkoff1973@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0672>

**Article info**

Received: 10.04.2026

Revised: 18.05.2026

Accepted: 03.06.2026

## Оценка газодинамической опасности угольных пластов в зависимости от неоднородности микроструктуры угля

И. Н. Горшенков✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова»

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

✉ [gorshenkov.in@mail.ru](mailto:gorshenkov.in@mail.ru)

**Резюме.** Предложен подход к дополнительной оценке газодинамической опасности угольных пластов, основанный на количественном описании неоднородности микроструктуры угля и ее сопоставлении с метаноносностью угля. Исследование выполнено на образцах, отобранных на забое пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова, которые при схожих горно-геологических условиях различались по скорости выхода метана. Микроструктура угля анализировалась по цифровым микро- снимкам его поверхности, полученным методом сканирующей электронной микроскопии, а их обработка была проведена в координатах «энтропия – сложность». Для серий изображений были определены границы информационной энтропии Шеннона и статистической сложности, после чего эти параметры сопоставлены с прямыми измерениями газоносности ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$ ). Показано, что микроструктурная неоднородность связана не только с особенностями накопления и удержания метана, но и со способностями его выделения при разгрузке массива и разрушении угля. Сочетание повышенной метаноносности с широким диапазоном значений энтропии и сложности может рассматриваться как дополнительный признак потенциальной газодинамической опасности. Полученные результаты подтверждают, что анализ микроструктуры угля способен служить дополнительным инструментом оценки газодинамической опасности пластов.

**Ключевые слова:** угольный пласт, метаноносность, микроструктура угля, энтропия – сложность, электронная микроскопия, фильтрация и диффузия метана, Кузбасс

**Благодарность:** Автор выражает благодарность за поддержку и помощь в подготовке материала научному руководителю ведущему научному сотруднику доктору технических наук Екатерине Васильевне Ульяновой и научному сотруднику Борису Николаевичу Пашичеву.

**Для цитирования:** Горшенков И.Н. Оценка газодинамической опасности угольных пластов в зависимости от неоднородности микроструктуры угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 50-55. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55>.

## Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on the heterogeneity of coal microstructure

I. N. Gorshenkov✉

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

✉ [gorshenkov.in@mail.ru](mailto:gorshenkov.in@mail.ru)

**Abstract.** An approach is proposed for the additional assessment of gas-dynamic hazard of coal seams based on the quantitative characterization of coal microstructure heterogeneity and its correlation with methane content. The study was carried out on coal samples collected from the working face of the Boldyrevsky seam at the S.M. Kirov mine, which exhibited differences in methane release rates under similar mining and geological conditions. The microstructure was analyzed using digital surface micrographs obtained by scanning electron microscopy, and image processing was performed in entropy – complexity coordinates. For the image series, the ranges of Shannon information entropy and statistical complexity were determined and subsequently compared with direct measurements of methane content ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$ ). It is shown that microstructural heterogeneity is associated not only with methane accumulation and retention but also with its release behavior during stress unloading and coal failure. The combination of elevated methane content and a wide range of entropy and complexity values can be considered an additional indicator of potential gas-dynamic

hazard. The obtained results confirm that coal microstructure analysis can serve as a supplementary tool for assessing gas-dynamic hazard of coal seams.

**Keywords:** coal seam, methane content, coal microstructure, entropy – complexity, electron microscopy, methane filtration and diffusion, Kuzbass

**Acknowledgements:** The author expresses gratitude for the support and assistance in preparing the material to scientific advisor Ekaterina V. Ulyanova, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, and to Boris N. Pashichev, Researcher.

**For citation:** Gorshenkov I.N. Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on the heterogeneity of coal microstructure. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 50-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55>.

## Введение

Одной из ключевых задач современной горной науки и угледобычи является повышение безопасности ведения горных работ, что в значительной степени связано с необходимостью надежного прогнозирования и предупреждения газодинамических явлений (ГДЯ). Особую опасность среди них представляют внезапные выбросы угля и газа, создающие непосредственную угрозу жизни людей и нарушающие устойчивость производственных процессов [1–5]. Основным фактором, обуславливающим развитие таких явлений, является шахтный метан, содержащийся в поровом пространстве и структуре угля и интенсивно выделяющийся в выработанное пространство при разработке пласта. Поэтому прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений, связанных с метаносностью угольных пластов, имеет особую значимость, поскольку к ним относятся как внезапные выбросы угля и газа, так и повышенное газовыделение в горные выработки, способное привести к образованию взрывоопасных смесей метана с воздухом и угольной пылью.

На практике прогноз обычно строится по данным метанообильности, газового давления, параметров дегазации и прямых измерений газоносности пласта. Эти показатели важны, но в основном отражают текущее состояние массива и лишь косвенно описывают строение угольного вещества, от которого зависит накопление и удержание при высвобождении метана. Кроме того, стандартные методы определения газоносности трудоемки, требуют специального оборудования и практически не характеризуют пространственную организацию порово-трещинного пространства [6–11]. Именно микроструктурная организация угля в значительной степени задает емкость сорбционного пространства, соотношение свободного и сорбированного метана, интенсивность его миграции и характер газовыделения при разгрузке пласта. Поэтому даже в схожих горно-геологических условиях образцы с разным строением угольного вещества могут заметно различаться по газодинамической активности [12, 13].

В связи с этим представляет интерес методика, которая позволяет перевести наблюдаемую микроструктурную неоднородность в измеряемые параметры с последующим сопоставлением их с метаносностью угля. Для такой оценки в работе использован метод «энтропия – сложность», применяемый при анализе сложных систем и цифровых изображений [14–16]. Похожие решения уже использовались при изучении структурной неоднородности угольного вещества и его склонности к самовозгоранию [17], однако сопоставление параметров «энтропия – сложность» с компонентами газоносности  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$  для задач прогноза газодинамической опасности требует отдельной проверки.

**Цель исследования:** оценить, насколько совместный анализ микроструктуры угля и метаносности может служить дополнительным признаком газодинамической опасности.

## Материал и методы исследования

Исследование выполнено на образцах угля пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова, отобранных в различных точках выемочного участка при близких горно-геологических условиях, но различающихся по величине метаносности. Методологическую основу работы составил комплексный подход, объединяющий электронную микроскопию, цифровую обработку изображений и статистический анализ микроструктуры.

Микроструктура образцов изучалась по цифровым снимкам, полученным на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV при увеличении  $\times 1000$ . Для каждого образца выполняли не менее двух – трех серий снимков; в каждой серии анализировали в среднем по 10 изображений с различных участков поверхности, что обеспечивало репрезентативность выборки.

Количественную обработку микроснимков выполняли с помощью специализированной программы, реализующей метод «энтропия – сложность». Этот подход позволяет представить визуальную различимую неоднородность поверхности в виде системы воспроизводимых числовых характеристик.

Метод основан на представлении цифрового изображения как распределения яркостных и контурных признаков с последующим анализом в терминах информационной энтропии Шеннона  $H$  и статистической сложности  $C$ . Параметр  $H$  характеризует степень неопределенности распределения элементов изображения, тогда как параметр  $C$  отражает выраженность их структурной организации.

Рост значений  $H$  соответствует более неоднородному и менее упорядоченному распределению элементов (паттернов) угольной микроструктуры. Показатель  $C$  рассчитывается с использованием расстояния Йенсена – Шеннона между анализируемым и равномерным распределениями и позволяет выделять состояния, удаленные как от полного порядка, так и от предельного хаоса [14–16].

Результаты интерпретировали на плоскости «энтропия – сложность». По положению точек и ширине областей их распределения сопоставляли образцы по степени микроструктурной неоднородности и выраженности организованных структурных паттернов. Такой анализ позволяет различать угольные образцы, близкие по петрографическим признакам, но отличающиеся пространственной организацией угольного вещества [12, 13, 17].

Метаносность образцов определяли по методике ИПКОН РАН как сумму трех составляющих. Показатель  $Q_1$  характеризует объем свободного и быстросорбируемого метана, выделившегося сразу после отбора пробы и помещения ее в герметичную камеру. Показатель  $Q_2$  отражает газ, выделившийся в период транспортирования и выдержки пробы до лабораторных измерений, а  $Q_3$  соответствует

остаточному объему метана, высвобождающемуся после полного механического разрушения образца. Суммарную газоносность  $Q_{\Sigma}$  рассчитывали как  $Q_1 + Q_2 + Q_3$  и выразили в м<sup>3</sup>/тсбм. Такая схема дает возможность раздельно оценить вклад свободного, диффузионно-выделяющегося и прочно удерживаемого метана, что существенно при сопоставлении показателей газоносности с параметрами микроструктуры.

Метаноносность угольных пластов определяется не только объемом порового пространства, но в значительной степени обусловлена микроструктурной неоднородностью угольного вещества. Пространственное распределение зон различной степени упорядоченности формирует сложную систему удержания и миграции газа. Именно вариации микроструктурной организации угля определяют условия аккумуляции метана, его локализацию и кинетику выделения, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние как на общую метаноносность, так и на склонность массива к проявлению газодинамических явлений.

### Результаты исследований

В таблице 1 приведены точки отбора исследуемых проб угля пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова.

Таблица 1 / Table 1

Пробы угля пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова / Coal samples from the Boldyrevsky seam of the S.M. Kirov mine

| № пробы | Место отбора пробы                          |
|---------|---------------------------------------------|
| 256     | Вентиляционная печь лавы 24-63, ПК 198      |
| 261     | Конвейерная печь лавы 24-63, мт 1530 + 10 м |
| 268     | Конвейерная печь лавы 24-63, ПК 111 + 7 м   |

В таблице 2 представлены осредненные значения газоносности образцов № 256, 261 и 268, полученные по составляющим  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и суммарному показателю  $Q_{\Sigma}$ .

Таблица 2 / Table 2

Осредненные значения газоносности пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова / Average methane content values for the Boldyrevsky seam at the S.M. Kirov mine

| Компонент газоносности              | Проба |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                     | № 256 | № 261 | № 268 |
| $Q_1$ , м <sup>3</sup> /тсбм        | 0,32  | 0,28  | 0,30  |
| $Q_2$ , м <sup>3</sup> /тсбм        | 0,20  | 0,34  | 0,05  |
| $Q_3$ , м <sup>3</sup> /тсбм        | 8,94  | 9,64  | 8,26  |
| $Q_{\Sigma}$ , м <sup>3</sup> /тсбм | 9,46  | 10,27 | 8,61  |

Наибольшее значение  $Q_{\Sigma}$  установлено для образца № 261 (10,27 м<sup>3</sup>/тсбм), минимальное – для образца № 268 (8,61 м<sup>3</sup>/тсбм). При этом наибольший разброс характерен для показателя  $Q_2$ , отражающего совместное действие фильтрационных и диффузионных механизмов газовыделения.

На рисунке 1 представлена нормированная гистограмма распределения составляющих газоносности для случаев  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и суммарного значения  $Q_{\Sigma}$ . Каждая колонка приведена к единице, что позволяет анализировать относительный вклад отдельных образцов (№ 256, 261, 268) в общую газоносность независимо от ее абсолютных значений.

Как видно из рисунка 1, доли  $Q_1$  и  $Q_3$  изменяются сравнительно слабо, тогда как параметр  $Q_2$  отличается наиболее за-

метной вариабельностью. Это указывает на существенную роль особенностей микроструктуры в процессах промежуточного газовыделения после отбора пробы [6–12]. Обработка микроснимков по методу «энтропия – сложность» выявила различия в микроструктурной организации исследуемых образцов.

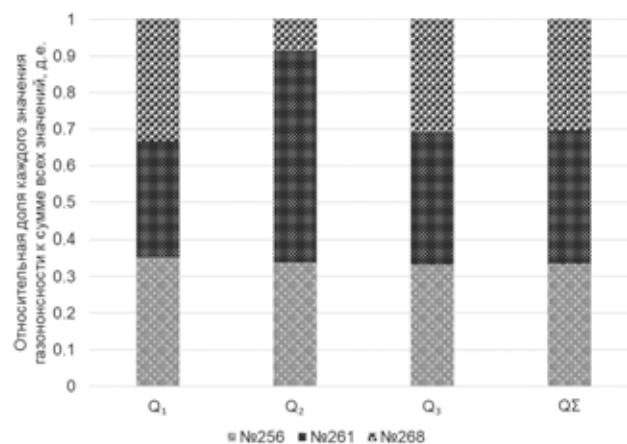


Рис. 1. Нормированная гистограмма распределения составляющих газоносности /

Fig. 1. Normalized histogram of methane content component distribution

На рисунках 2–4 представлены диаграммы «энтропия – сложность» по отдельным сериям снимков и их обобщенные варианты для образцов № 256, 261 и 268.

В таблице 3 приведены граничные значения энтропии и сложности, а также диапазоны их изменения для исследуемых образцов. Таким образом, видно, что наибольшая ширина области распределения характерна для образца № 261 ( $\Delta H = 0,267$ ;  $\Delta C = 0,147$ ), тогда как образец № 268 характеризуется более узкой, но смещенной в область повышенной энтропии зоной.

Таблица 3 / Table 3

Граничные значения энтропии и сложности образцов / Boundary values of entropy and complexity for the samples

| № пробы | Граница | H     | C     | $\Delta H$ | $\Delta C$ |
|---------|---------|-------|-------|------------|------------|
| № 256   | Левая   | 0,553 | 0,212 | 0,256      | 0,151      |
|         | Правая  | 0,809 | 0,364 |            |            |
| № 261   | Левая   | 0,540 | 0,203 | 0,267      | 0,147      |
|         | Правая  | 0,807 | 0,350 |            |            |
| № 268   | Левая   | 0,655 | 0,231 | 0,138      | 0,087      |
|         | Правая  | 0,793 | 0,319 |            |            |

### Обсуждение результатов

По сравнению с образцами № 256 и 261 в образце № 268 значения энтропии находятся в области больших величин при сравнительно узком диапазоне  $H$  и  $C$ , что указывает на преимущественно разупорядоченную, но статистически более однородную по выборке микроструктуру. Для образцов № 256 и особенно № 261 характерен более широкий разброс точек на плоскости «энтропия – сложность», то есть присутствует сочетание участков с большей и меньшей упорядоченностью. Именно у образца № 261, имеющего максимальную суммарную метаноносность, наблюдается и наибольшая ширина области распределения, что может свидетельствовать о соче-

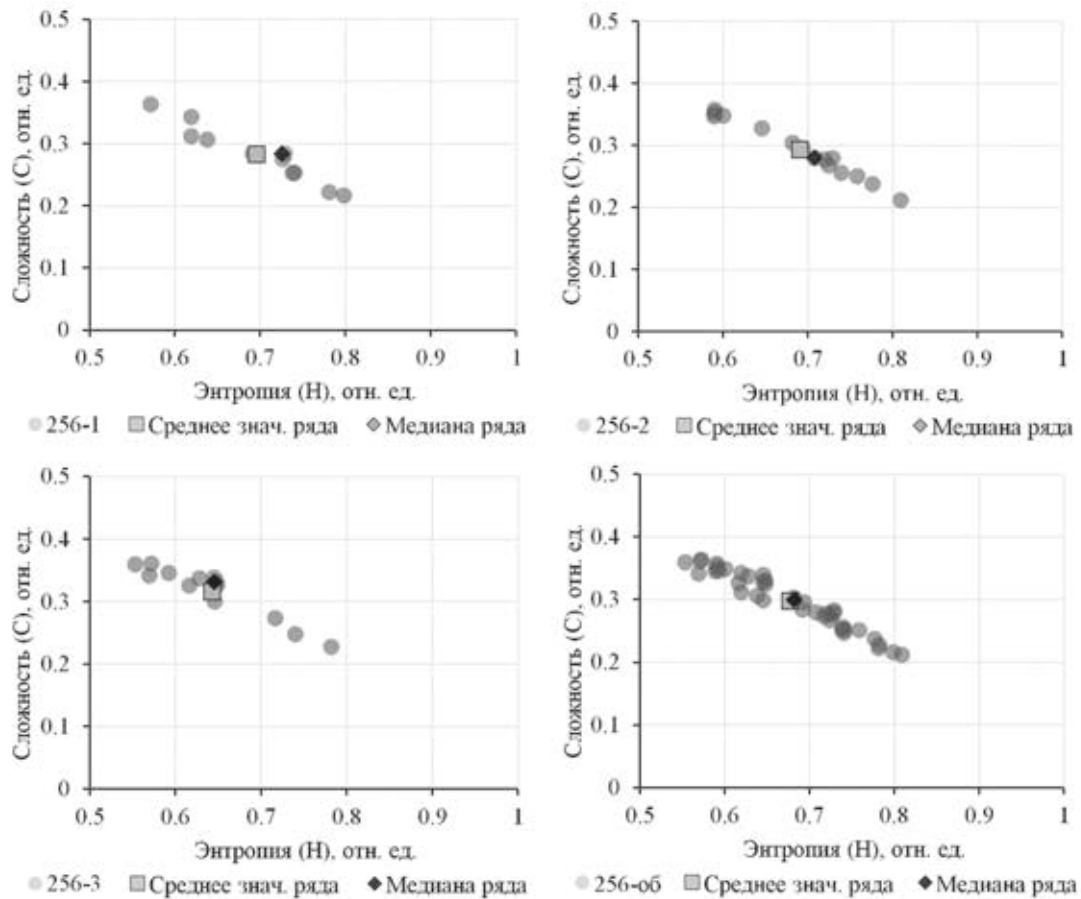


Рис. 2. Диаграммы «энтропия – сложность» для 3 серий снимков и их обобщение для образца № 256 /  
Fig. 2. Entropy-complexity diagrams for three image series and their generalized representation for sample No. 256

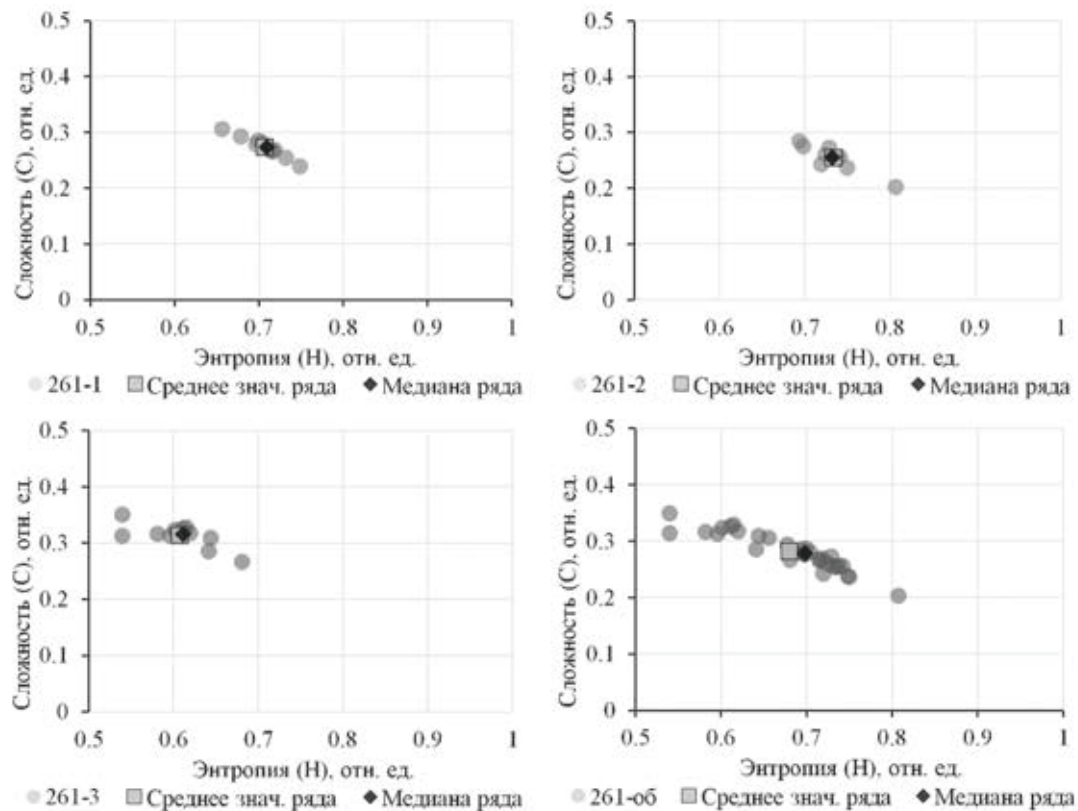


Рис. 3. Диаграммы «энтропия – сложность» для 3 серий снимков и их обобщение для образца № 261 /  
Fig. 3. Entropy-complexity diagrams for three image series and their generalized representation for sample No. 261

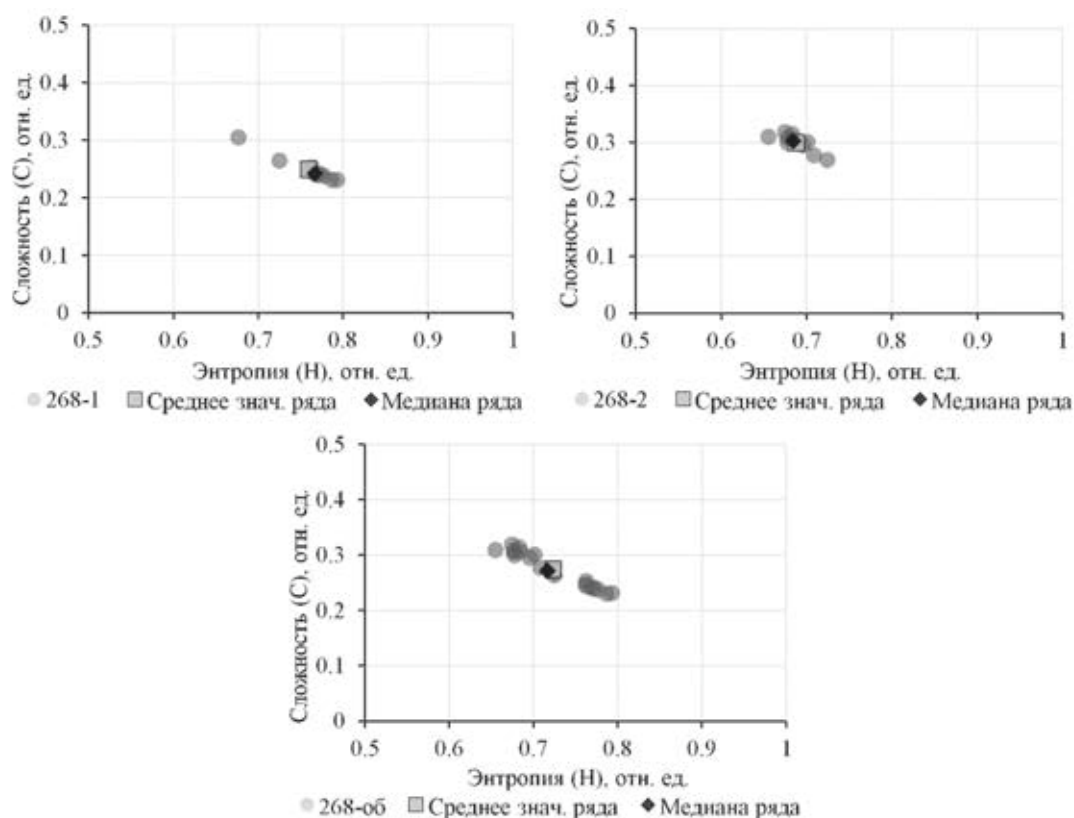


Рис. 4. Диаграммы «энтропия – сложность» для 2 серий снимков и их обобщение для образца № 268 /  
Fig. 4. Entropy-complexity diagrams for three image series and their generalized representation for sample No. 268

тании развитого сорбционного пространства и структурных условий для неравномерного высвобождения газа [12, 13].

С точки зрения прогноза газодинамических явлений принципиально важно не только абсолютное значение метаносности, а именно характер сочетания метаносности с микроструктурной неоднородностью. При наличии участков с различной степенью упорядоченности в процессе разгрузки и разрушения угля часть метана быстро поступает из более проницаемых зон, тогда как другая часть высвобождается позднее за счет наличия сорбционных центров на оборванных связях. Такое пространственно-кинетическое несоответствие создает условия для локальной концентрации газового давления, ускоренного развития микротрещин и потери прочности угольного вещества, то есть повышает вероятность реализации газодинамических явлений в очистных и подготовительных выработках [1–5, 9–13].

Следовательно, параметрическая область «энтропия – сложность» может рассматриваться как дополнительный диагностический признак выбороопасности. Наиболее неблагоприятным следует считать сочетание повышенной суммарной метаносности с расширенной областью распределения точек на плоскости «энтропия – сложность», поскольку оно отражает одновременное наличие значительного газового потенциала и выраженной микроструктурной неоднородности, определяющей неравномерный характер десорбции и фильтрации метана [14–17].

#### Заключение

1. Показано, что метод «энтропия – сложность» позволяет количественно описывать неоднородность микроструктуры

угля по данным электронной микроскопии и сопоставлять образцы не только по средним значениям энтропии и сложности, но и по диапазону их изменений. Структура угля, обладающая более однородными областями, быстрее отдает метан, в то время как в углях с большой неоднородностью микроструктуры метан удерживается за счет большого количества оборванных алифатических связей, являющихся сорбционными центрами, поэтому скорость его выхода из угля замедлена.

2. Установлено, что различия в микроструктурной организации сопровождаются изменением распределения составляющих газосодержания  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$ . Наиболее значимым для прогноза представляется значение  $Q_2$ , которое отражает наличие в угле участков с различными условиями накопления и высвобождения метана.

3. Таким образом, анализ микроструктуры угля в координатах «энтропия – сложность» может рассматриваться как дополнительный инструмент оценки газодинамической опасности пластов и использоваться совместно с традиционными показателями газосодержания, газового давления и технологических условий ведения горных работ.

#### Выводы

1. В статье предложен подход к дополнительной оценке газодинамической опасности угольных пластов, основанный на количественном описании неоднородности микроструктуры угля и ее сопоставлении с метаносностью угля.

2. Полученные результаты подтверждают, что анализ микроструктуры угля способен служить дополнительным инструментом оценки газодинамической опасности пластов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Любимищенко Е.И. и др. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 1: 108-120. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120>.  
Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I., et al. Mechanism of sudden methane outbursts in coal seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; 1: 108-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120>.
2. Portnov V.S., Mindubayev A., Golik A., et al. Risk assessment of sudden coal and gas outbursts based on 3D modeling of coal seams and integration of gas-dynamic and tectonic parameters. *Fire*. 2025; 8 (6): 234. <https://doi.org/10.3390/fire8060234>.
3. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Киряева Т.А. и др. Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности. Часть II: Влияние геотермических, геодинамических и физико-химических процессов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; 10: 5-29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-5-29>.  
Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A., et al. Regional clustering of Kuzbass coal deposits by gas-dynamic activity. Part II: Influence of geothermal, geodynamic and physicochemical processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018; (10): 5-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-5-29>.
4. Портнов В.С., Иманбаева С.Б., Муллагалиева Л.Ф. и др. Прогноз природной метаноносности при разработке угольных пластов. *Уголь*. 2020; 11 (1136): 53-57. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-11-53-57>.  
Portnov V.S., Imanbaeva S.B., Mullagalieva L.F., et al. Forecast of natural methane content in coal seam mining. *Coal*. 2020; 11 (1136): 53-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-11-53-57>.
5. Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А. и др. Взрывы и выбросы метана: квантовая теория метаноносности, выбросоопасности и дегазации угольных пластов. *Горная промышленность*. 2019; 4: 138-143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-4-138-143>.  
Kolesnichenko I.E., Artem'ev V.B., Kolesnichenko E.A., et al. Methane explosions and outbursts: Quantum theory of methane content, outburst hazard and degassing of coal seams. *Mining*. 2019; 4: 138-143. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-4-138-143>.
6. Liu D., Yao Y., Tang D., et al. Pore structure characterization and its significance for gas adsorption in coals: A comprehensive review. *Unconventional Resources*. 2022; 2: 139-157. <https://doi.org/10.1016/j.unres.2022.10.002>.
7. Wang Z., Li X., Zhang S., et al. Effects of micro-mesopore structure characteristics on methane adsorption capacity of medium rank coal. *Fuel*. 2023; 351: 128910. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128910>.
8. Jiang B., Zhao Y., Lin B., et al. Effect of faults on the pore structure of coal and its resultant change on gas emission. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020; 195: 107919. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107919>.
9. Feng G., Zhao Y., Lin B., et al. Fractal pore and its impact on gas adsorption capacity of outburst coal: Geological significance to coalbed gas occurrence and outburst. *Adsorption Science & Technology*. 2022; 2022: 4273900. <https://doi.org/10.1155/2022/4273900>.
10. Zou P., Liu Y., Chen J., et al. Study on pore structure and adsorption properties of coal and microscopic action mechanism of outburst. *Scientific Reports*. 2025; 15: 7374. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91284-6>.
11. Liu Y., Chen J., Guo M., et al. Study on the differences in the microstructure between outburst and nonoutburst coal. *ACS Omega*. 2025; 10: 33149-33161. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02669>.
12. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Федоров Е.В. и др. Кинетика газовыделения метана из угля различной микроструктурной неоднородности. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025; 6: 36-43. <https://doi.org/10.15372/FTPR-PI20250604>.  
Ul'yanova E.V., Malinnikova O.N., Fedorov E.V., Gorshenkov I.N., et al. Kinetics of Methane mission from coal of different microstructural non-uniformity. *Journal of Mining Science*. 2025; 61 (6): 893-899. <https://doi.org/10.1134/S1062739125060043>.
13. Малинникова О.Н., Ульянова Е.В., Харченко А.В. и др. Влияние микроструктуры угля на газонасыщенность призабойной зоны. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020; 3: 25-33. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200303>.  
Malinnikova O.N., Ulyanova E.V., Kharchenko A.V., et al. Influence of coal microstructure on gas content of the face area. *Physical and technical problems of mineral development*. 2020; 3: 25-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200303>.
14. Lopez-Ruiz R., Mancini H.L., Calbet X. A statistical measure of complexity. *Physics Letters A*. 1995; 209: 321-326. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(95\)00867-5](https://doi.org/10.1016/0375-9601(95)00867-5).
15. Rosso O.A., Larrondo H.A., Martin M.T., et al. Distinguishing noise from chaos. *Physical Review Letters*. 2007; 99: 154102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.154102>.
16. Brazhe A.R. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns. *Physical Review E*. 2018; 97: 061301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.061301>.
17. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Докучаева А.И., и др. Влияние неоднородности структуры угольного вещества на склонность угля к самовозгоранию. *Химия твердого топлива*. 2022; 6: 18-24. <https://doi.org/10.31857/S0023117722060093>.  
Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Dokuchaeva A.I., Pashichev B.N. Influence of heterogeneity of coal matter structure on coal propensity to spontaneous combustion. *Solid fuel chemistry*. 2022; 6, 18-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0023117722060093>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Иван Николаевич Горшенков** – аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: gorshenkov.in@mail.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.06.2026  
Поступила после рецензирования: 18.06.2026  
Принята к публикации: 23.06.2026

## ABOUT THE AUTHOR

**Ivan N. Gorshenkov** – Graduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: gorshenkov.in@mail.ru

## Article info

Received: 01.06.2026  
Revised: 18.06.2026  
Accepted: 23.06.2026

## Исследование масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород методом конечно-дискретных элементов в программном комплексе PROROCK 2.0

А. К. Кирсанов<sup>✉</sup>, А. С. Ткаченко, С. А. Богомолов

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

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

**Резюме.** Представлены результаты численного моделирования исследования масштабного эффекта при одноосном сжатии однородных горных пород с использованием специализированного программного комплекса PROROCK 2.0, реализующего метод конечно-дискретных элементов. Целью работы являлось определение закономерностей изменения прочностных характеристик пород в зависимости от размеров образца при сохранении физико-механических свойств и условий нагружения. Моделирование выполнялось для двух горных пород: мрамора и базальта. Полученные зависимости выявили снижение прочности с увеличением размеров образца, что указывает на проявление масштабного эффекта. Установлено, что разрушение носит хрупкий характер. Результаты работы показывают степень проявления масштабного эффекта и необходимость его учета при переходе от лабораторных экспериментов к инженерным расчетам устойчивости массивов горных пород.

**Ключевые слова:** прочность горных пород, одноосное сжатие, метод конечно-дискретных элементов, разрушение пород, масштабный эффект

**Благодарность:** Авторы выражают благодарность компании ООО «Скиентия» за предоставленное программное обеспечение PROROCK, а также консультационную и методическую поддержку, оказанную при выполнении настоящего исследования.

**Для цитирования:** Кирсанов А.К., Ткаченко А.С., Богомолов С.А. Исследование масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород методом конечно-дискретных элементов в программном комплексе PROROCK 2.0. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 56-61. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-56-61>.

## Study of scale effect under uniaxial compression of rocks using the finite-discrete element method in the «PROROCK 2.0» software

A. K. Kirsanov<sup>✉</sup>, A. S. Tkachenko, S. A. Bogomolov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

**Abstract.** The paper presents the results of numerical modeling of the scale effect under uniaxial compression of homogeneous rock samples using the specialized software package PROROCK 2.0, which implements the finite-discrete element method. The aim of the study was to determine the patterns of variation in the strength characteristics of rocks depending on specimen size while maintaining identical physical and mechanical properties and loading conditions. The simulations were carried out for two types of rocks – marble and basalt. The obtained relationships revealed a decrease in strength with increasing specimen size, indicating the presence of a scale effect. It was established that the failure mechanism is brittle in nature. The results demonstrate the extent of the scale effect and highlight the necessity of accounting for it when transitioning from laboratory experiments to engineering calculations of rock mass stability.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to LLC «Scientia» for providing the PROROCK software, as well as for the consulting and methodological support provided during the course of this study.

**Keywords:** rock strength, uniaxial compression, finite-discrete element method, rock failure, scale effect

**For citation:** Kirsanov A.K., Tkachenko A.S., Bogomolov S.A. Study of scale effect under uniaxial compression of rocks using the finite-discrete element method in the «PROROCK 2.0» software. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 56-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-56-61>.

## Введение

**И**сследование прочностных свойств и механизмов разрушения горных пород при различных масштабах нагружения является одной из ключевых задач современной геомеханики [1–4]. От того, насколько достоверно определены данные параметры, зависит точность расчетов устойчивости откосов бортов карьеров, подземных горных выработок, массивов пород, а также корректность прогноза деформационно-прочностных характеристик при проектировании горнотехнических сооружений.

При решении большинства инженерно-геомеханических задач исходными параметрами служат результаты лабораторных испытаний образцов горных пород. Однако опыт эксплуатации горных предприятий показывает, что значения прочности и деформируемости, определенные по результатам испытаний образцов малого размера, часто оказываются выше, чем фактические характеристики породного массива. Вследствие этого при инженерных расчетах, основанных на лабораторных данных, модели устойчивости горных выработок и откосов могут давать завышенную оценку предельных нагрузок и устойчивого состояния массива, особенно при сложном напряженно-деформированном состоянии пород [5–7].

Основной причиной таких расхождений является неоднородность горного массива: наличие в нем трещин, прослоек и структурных дефектов, отсутствующих в лабораторных образцах. С увеличением объема исследуемого материала возрастает вероятность присутствия таких дефектов, что закономерно снижает их прочность. Таким образом, механические свойства горных пород оказываются зависимыми не только от их минерального состава и структуры, но и от масштаба (размеров) рассматриваемого объема, что подтверждается рядом теоретических и экспериментальных работ [7–11].

Такое явление называют *масштабным эффектом*. Суть его в том, что прочность и особенности деформирования горной породы меняются в зависимости от размеров образца или расчетной области. Поэтому при переходе от лабораторных испытаний к условиям реального массива этот фактор обязательно нужно учитывать, чтобы корректно использовать полученные параметры в геомеханических расчетах.

Масштабный эффект в природных массивах в первую очередь обусловлен их неоднородным строением и наличием различных дефектов. Вместе с тем его проявление возможно и в образцах, где отсутствуют заметные трещины или другие структурные нарушения.

На настоящий момент известно несколько гипотез, объясняющих закономерное снижение прочности материала при увеличении образца или расчетной области. Среди них можно выделить теорию распределения Вейбулла [12], где вероятность разрушения определяется статистическим распределением дефектов. Согласно данной теории, с увеличением размера образца возрастает вероятность наличия критического дефекта, способного инициировать разрушение. Также стоит отметить теорию Бажанта [13], ее основная идея заключается в том, что разрушение – процесс энергетический. При увеличении размеров образца масштаб взаимодействия и геометрических границ изменяет эффективную прочность. Кроме них существуют: теория масштабного разрушения [14] – поверхность разрушения обладает фрактальной структурой, а эффективная энергия разрушения и прочность за-

висят от фрактальной размерности; и гранично-эффектная теория [15] – масштабный эффект связан не с размером образца, а с взаимодействием зоны разрушения с ближайшей геометрической границей образца. Размер зоны разрушения остается постоянным, но доля этой зоны по отношению к размеру образца уменьшается.

В настоящем исследовании рассматривается влияние масштабного эффекта на прочностные характеристики горных пород при одноосном сжатии для идеализированной однородной среды, в которой отсутствуют трещины и структурные неоднородности. Численные эксперименты выполнены в программном комплексе PROROCK 2.0 для серии образцов с размерами (от 20 до 220 мм), что позволило выявить закономерность изменения предельных нагрузок и напряжений разрушения в зависимости от размера образца.

**Цель исследования:** установить закономерности проявления масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород в условиях однородной среды, а также определить механическую природу изменения их прочностных характеристик с увеличением размера образца.

## Методология

Моделирование с использованием метода конечно-дискретных элементов, реализованного в программном комплексе PROROCK 2.0, предоставляет возможность явно воспроизводить процессы деформирования и разрушения, что делает возможным исследование масштабного эффекта.

В основе метода моделирования лежит представление материала в виде совокупности конечных элементов, соединенных связующими элементами (рис. 1а). При достижении предельных напряжений в связях реализуется разрыв сплошности, что обеспечивает явное моделирование процесса разрушения (рис. 1б).

Расчеты проводились в двумерной среде (2D), что соответствует рассмотрению поперечного сечения цилиндрического образца при одноосном сжатии. Чтобы исключить влияние случайной неоднородности структуры, применялись условно однородные и изотропные модели без исходных трещин с заданными параметрами. Такой подход позволил сосредоточиться именно на проявлении масштабного эффекта, не учитывая влияние анизотропии или возможных геометрических несовершенств.

Геометрия модели представляла собой цилиндр высотой, равной двум диаметрам образца. Таким образом, сохранялось соотношение  $h / d = 2$ . Диаметр образцов варьировался в диапазоне 20–220 мм: 20, 30, 40, 50, 60, 100, 150 и 220 мм. Верхняя плоскость образца нагружалась равномерно движущейся плитой пресса с постоянной скоростью, равной 0,01 м/с. На контакте между плитой пресса и плоскостью образца было задано условие как между сталью и горной породой. Это было реализовано с помощью свойства трещины (рис. 2).

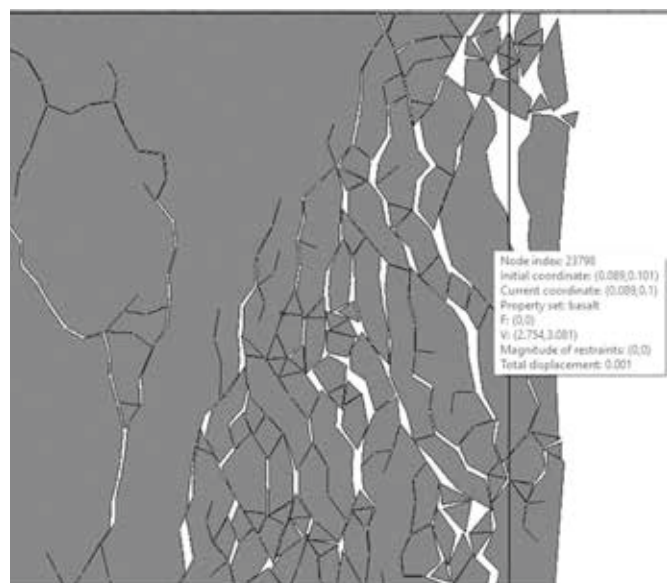
Для моделирования использовались параметры, соответствующие типичным значениям для **мрамора** и **базальта** (табл. 1).

Для каждого из образцов (всего было 16 шт.) выполнено моделирование испытаний на одноосное сжатие, при которых были заданы идентичные условия (табл. 1). Трещиноватость и другая структурная неоднородность не задавалась с целью получения оценки масштабного эффекта без влияния вторичных факторов.

Основным результатом проведенного моделирования стало получение зависимостей «напряжение – деформация». Полученные данные приведены к единой системе координат и использованы для построения зависимости прочности образца от его размера, отражающей проявление масштабного эффекта.



(a)



(b)

Рис. 1. Отображение элементов до нарушения сплошности и после /  
Fig. 1. Element's display before destruction and after

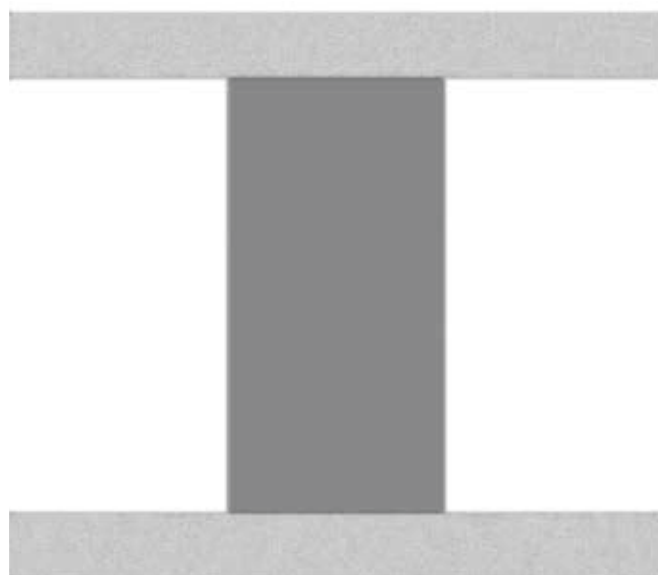
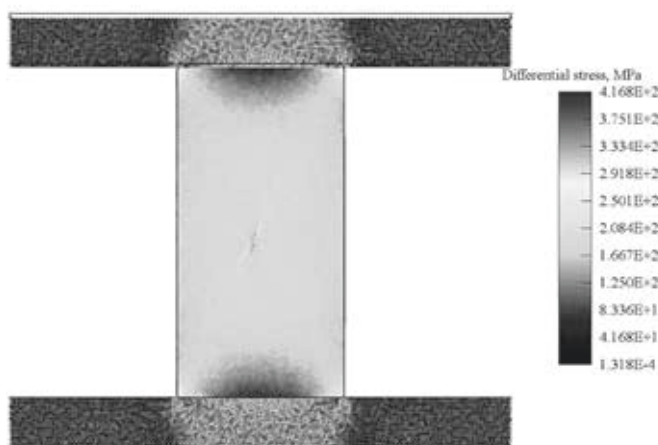


Рис. 2. Геометрическая модель образца d = 100 мм и схемы его нагружения  
в программном комплексе PROROCK 2.0 /

Fig. 2. Geometric model of a sample d=100 mm and its loading diagram in  
«PROROCK 2.0» software

В процессе моделирования регистрировались следующие параметры:

- распределение напряжений и деформаций по всему образцу (рис. 3а);
- величина вертикального перемещения нагружающей плиты;
- момент наступления предельного состояния (максимальное напряжение), когда образец разрушается (рис. 3б).



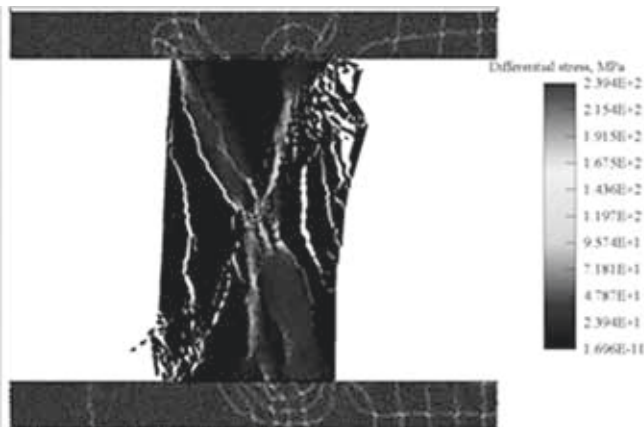
(a)

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические свойства пород, используемых при моделировании /  
Physical and mechanical properties of rocks used in modeling

| Материал /<br>Name of material | Основные свойства / Main properties |    |       |        |    |        |     |         |         |       |        |       |     |
|--------------------------------|-------------------------------------|----|-------|--------|----|--------|-----|---------|---------|-------|--------|-------|-----|
|                                | $\rho$                              | E  | $\nu$ | VD     | C  | $\phi$ | UTS | $\phi'$ | Sp/h    | Sr/Sp | Op/h   | Or/Op | PP  |
| Мрамор / Marble                | 2 690                               | 45 | 0,35  | 10 000 | 32 | 38     | 8   | 38      | 0,00125 | 15    | 0,0002 | 5     | 450 |
| Базальт / Basalt               | 3 000                               | 50 | 0,25  | 8 000  | 44 | 42     | 20  | 42      | 0,00125 | 15    | 0,0002 | 5     | 500 |

Примечание:  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>; E – модуль Юнга, ГПа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона; VD – вязкостное демпфирование; C – сцепление, МПа;  $\phi$  – угол внутреннего трения, град.; UTS – предел прочности на растяжение, МПа;  $\phi'$  – угол внутреннего трения, град. Sp/h – относительное пиковое скольжение; Sr/Sp – относительное скольжение вниз; Op/h – относительное максимальное раскрытие; Or/Op – относительное разрывное открытие; PP – параметры штрафа, ГПа.

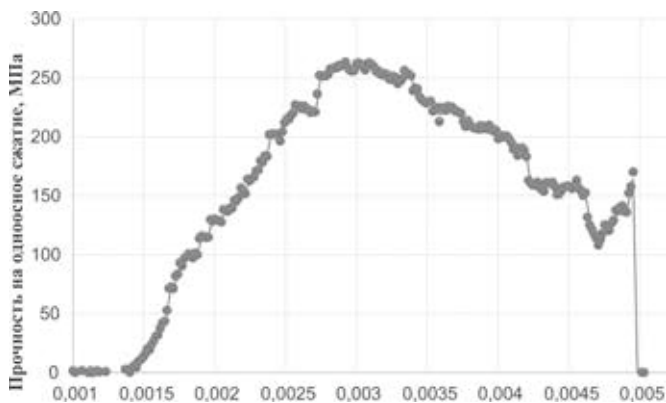


б (b)

**Рис. 3.** Поля дифференциальных напряжений в образце при одноосном сжатии: а – до разрушения; б – после разрушения / **Fig. 3.** Differential stress fields in the sample under uniaxial compression: a – before destruction; b – after destruction

### Результаты и обсуждение

По результатам расчетов для каждого образца были построены диаграммы деформирования, показывающие, как меняется его поведение при увеличении нагрузки (рис. 4).



**Рис. 4.** Диаграмма деформирования образца (на примере мрамора d = 50 мм) / **Fig. 4.** Deformation dependency of specimen (for example a marble with diameter of 50 mm)

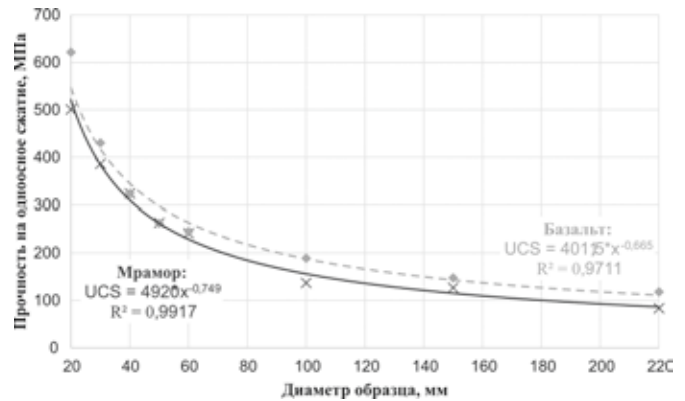
Во всех рассмотренных случаях процесс деформирования протекал по сходной схеме:

- на начальном этапе наблюдалась линейно-упругая зависимость при малых деформациях;
- затем происходило накопление микродеформаций, сопровождающееся некоторым снижением жесткости;
- далее достигалось максимальное напряжение, после чего происходили разрушение и потеря несущей способности.

Поскольку в моделях использовались однородные образцы без начальной трещиноватости, разрушение имело хрупкий характер и происходило практически без стадии пластического течения.

В ходе серии моделирования были определены максимальные нормальные напряжения, соответствующие моменту разрушения (рис. 5).

Для обоих материалов установлено, что с увеличением размеров образца наблюдается снижение пикового напряжения, что свидетельствует о проявлении масштабного эффекта.



**Рис. 5.** Зависимость прочности образцов при одноосном сжатии / **Fig. 5.** Dependence of uniaxial compressive strength on sample size for marble and basalt

В ходе серии моделирования были определены максимальные нормальные напряжения, соответствующие моменту разрушения (рис. 5). Для обоих материалов установлено, что с увеличением размеров образца наблюдается снижение пикового напряжения, это свидетельствует о проявлении масштабного эффекта.

Такое поведение согласуется с известными экспериментальными данными и теоретическими представлениями о масштабном эффекте [16–19]. На малых размерах образцов материал ведет себя как условно однородный и демонстрирует наибольшие значения прочности, тогда как при увеличении расчетного объема возрастает влияние геометрических факторов, приводящих к снижению эффективной несущей способности.

Результаты моделирования были сведены в таблицу 2.

Таблица 2 / Table 2

### Результаты замера прочности образцов при их различных диаметрах и однородной структуре / Results of strength measurements for specimens with different diameters and homogeneous structure

| Диаметр образца, мм / Specimen diameter, mm | Предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа / Uniaxial compressive strength of rocks, MPa |                  |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
|                                             | Мрамор / Marble                                                                               | Базальт / Basalt |
| 20                                          | 501                                                                                           | 622              |
| 30                                          | 387                                                                                           | 430              |
| 40                                          | 324                                                                                           | 324              |
| 50                                          | 264                                                                                           | 263              |
| 60                                          | 242                                                                                           | 245              |
| 100                                         | 137                                                                                           | 189              |
| 150                                         | 127                                                                                           | 148              |
| 220                                         | 84                                                                                            | 118              |

Во всех моделях разрушение начиналось в центральной части образца и развивалось в виде диагональных сдвигов к границам образца, направление развития трещин – вдоль направления нагружения. При увеличении диаметра образца наблюдалось расширение зоны разрушения и уменьшение концентрации напряжений.

Обработка результатов моделирования позволила установить следующие закономерности:

1. Для мрамора установлено, что при увеличении диаметра образцов с 20 до 220 мм отмечается существенное снижение прочностных характеристик – прочность уменьшается примерно на 83 %.

2. Для образцов из базальта получена похожая картина – при том же размере образцов было зафиксировано снижение прочности на 81 %.

Полученные зависимости, которые описывают характер изменения прочностных параметров, могут быть представлены в виде следующих выражений:

– для мрамора:

$$UCS = 4920 d^{-0.749}, \quad (1)$$

– для базальта:

$$UCS = 4011,5 d^{-0.665}, \quad (2)$$

где  $UCS$  – предел прочности образца на одноосное сжатие (Uniaxial Compressive Strength), МПа;  $d$  – диаметр образца, мм.

Результаты выполненного моделирования свидетельствуют о наличии выраженного масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород (мрамора и базальта).

### Заключение

1. Проведенное моделирование в ПК PROROCK 2.0 показало, что явление масштабного эффекта существенно влияет на прочностные характеристики горных пород (мрамора и базальта) при одноосном сжатии. При этом проявление данного эффекта возможно даже в условиях идеализированной монолитной и однородной структуры массива.

2. Полученные результаты моделирования для однородных пород (мрамора и базальта) показали следующие закономерности:

- прочностные характеристики горных пород снижаются с увеличением размеров испытываемых образцов;
- наиболее интенсивное снижение прочности зафиксировано в образцах малых размеров;
- по мере увеличения образцов масштабный эффект ослабевает.

3. Во всех рассмотренных случаях разрушение образцов носило хрупкий характер, при этом зона повреждения становилась более протяженной и менее концентрированной.

4. Полученные в результате моделирования зависимости (1 и 2) выявлены для однородной структуры (без трещин и других дефектов).

### Выводы

1. В работе представлены результаты численного моделирования исследования масштабного эффекта при одноосном сжатии однородных горных пород с использованием специализированного программного комплекса PROROCK 2.0, реализующего метод конечно-дискретных элементов.

2. Результаты исследований могут быть полезными для учета масштабного эффекта при переходе от прочностных характеристик лабораторных образцов к расчетным параметрам породного массива, а также могут быть использованы при калибровке геомеханических моделей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Choo J., Sun Y., Fei F. Size effects on the strength and cracking behavior of flawed rocks under uniaxial compression: from laboratory scale to field scale. *Acta Geotechnica*. 2023; 18 (7): 3451-3468. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01806-7>.
2. Hu C., Li X., Wu Y., et al. Experimental and numerical investigation on mechanical and fracture characteristics of jointed rock with varying roughness. *Journal of Safety and Sustainability*. 2025; 2 (1): 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.12.001>.
3. Chen Y., Sheng B., Xie S., et al. Crack propagation and scale effect of random fractured rock under compression-shear loading. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 23: 5164-5180. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.104>.
4. Zhao L.-Y., Ren L., Niu F.-J., et al. Estimation of elastic properties and failure strength of layered rocks with a multi-scale damage approach. *International Journal of Plasticity*. 2023; 168: 103681. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103681>.
5. Королев В.А. Теоретическая оценка масштабного эффекта в дисперсных грунтах. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2017; 6: 77-86.  
Korolev V.A. Theoretical assessment of size effect in dispersed soils. *Moscow University Geology Bulletin*. 2017; 6: 77-86. (In Russ.).
6. Шутов В.А., Миренков В.Е. Расчет деформирования и масштабный фактор в задачах геомеханики. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018; 5: 239-244. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-5-239-244>.  
Shutov V.A., Mirenkov V.E. Deformation analysis and size factor in geomechanics problems. *InterExpo Geo-Siberia*. 2018; 5: 239-244. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-5-239-244>. (In Russ.).
7. Супрун В.И., Левченко Я.В., Колотовкин А.С., Ворошилин К.С. Влияние масштабного фактора на прочность горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023; 10: 5-19. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_10\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_5).  
Suprun V.I., Levchenko Ya.V., Kolotovkin A.S., Voroshilin K.S. Influence of size effect on rock strength. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 10: 5-19. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_10\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_5). (In Russ.).
8. Ильницкая Е.И. Влияние масштабного фактора на прочностные свойства горных пород. *Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород*. Москва, 1972. С. 17-24.  
Il'nitskaya E.I. Influence of size effect on the strength properties of rocks. *Physical and mechanical properties, pressure and destruction of rocks*. Moscow, 1972: 17-24. (In Russ.).
9. Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях. *Проблемы механизации горных работ*. Москва, 1963: 39-56.  
Koifman M.I. The principal size effect in rocks and coals. *Problems of mechanization of mining operations*. Moscow, 1963: 39-56. (In Russ.).
10. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кузель С.В. Масштабный эффект в горных породах. Донецк, 2004: 132.  
Shashenko A.N., Sdvizhkova E.A., Kuzhel S.V. Size effect in rocks. Donetsk, 2004: 132 (In Russ.).
11. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavation in Rock. *Institution of Mining and Metallurgy*. 1980: 527.
12. Lobo-Guerrero S., Vallejo L. Application of Weibull statistics to the tensile strength of rock aggregates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006; 132 (6): 786-794. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:6\(786\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:6(786)).
13. Bažant Z.P. Concrete fracture models: testing and practice. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002; 69: 165-205. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00084-4).

14. Carpinteri A. Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. *Mechanics of Materials*. 1994. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)00008-5](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00008-5).
15. Wu X., Tao M., Yang Z., et al. Stress migration and failure mechanisms of rocks with holes under gradient stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2025; 195: 106306. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106306>.
16. Komurlu E. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *Geo-Engineering*. 2018; 9: 17. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>.
17. Hu Z., Xie L., Qin Y., et al. Numerical simulation of size effect of defective rock under compression condition. *Scientific Reports*. 2023; 13: 420. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27651-y>.
18. Латышев О.Г., Прищепа Д.В. Учет масштабного эффекта при проектировании параметров горной технологии. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2017; 1 (45): 59-61. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-1-59-61>.  
Latyshev O.G., Prishchepa D.V. Consideration of the scale effect in designing mining technology parameters. *News of the Ural State Mining University*. 2017; 1 (45): 59-61. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-1-59-61>. (In Russ.).
19. Volonté G., Stenebraten J., Papamichos E. Effect of specimen size and shape on the mechanical properties measured on plugs subsampled from sidewall cores. *E3S Web of Conferences*. 2023; 366. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336601014>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## ABOUT THE AUTHORS



**Александр Константинович Кирсанов** –  
канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»,  
г. Красноярск, Российская Федерация;  
e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

**Aleksandr K. Kirsanov** –  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian  
Federal University, Krasnoyarsk, Russian  
Federation; e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru



**Александр Сергеевич Ткаченко** –  
студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет», г. Красноярск, Российская  
Федерация

**Aleksandr S. Tkachenko** –  
Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk,  
Russian Federation



**Степан Александрович Богомолов** –  
студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет», г. Красноярск, Российская  
Федерация

**Stepan A. Bogomolov**  
Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk,  
Russian Federation

### Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

### Contribution:

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

### Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.03.2026  
Поступила после рецензирования: 10.05.2026  
Принята к публикации: 24.05.2026

### Article info

Received: 27.03.2026  
Revised: 10.05.2026  
Accepted: 24.05.2026

## Механико-математическая модель расчета деформированного состояния кровли камер подземного скважинного выщелачивания урана

Е. С. Орынгожин<sup>1,2</sup>, Р. А. Юсубалиев<sup>3</sup>, М. К. Жексенов<sup>4</sup>,

Е. Е. Орынгожа<sup>5</sup>✉, Н. А. Милетенко<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела имени Д. А. Кунаева, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>3</sup>Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>4</sup>Атырауский университет имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика Казахстан

<sup>5</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>6</sup>ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация

✉ e24.01@mail.ru

**Резюме.** Уран является одним из видов топлива для ядерной энергетики и рассматривается как стратегический материал для военных целей и обеспечения энергетической независимости страны. Традиционный способ добычи заключается в извлечении руды из недр, ее дроблении и обработке для получения искоемых минералов. В технологии подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), также известного как добыча растворением, руда остается на месте залегания, и через нее прокачиваются жидкости для выщелачивания минералов.

В статье дана механико-математическая модель расчета деформированного состояния кровли камер ПСВ урана. При подземной разработке полезных ископаемых методом ПСВ размываемый массив горных пород испытывает комплекс переменных напряжений и деформаций, приводящих к сдвигению и разрушению пород. Образование камер ПСВ при размыве массива осадочных пород приводит к нарушению исходного напряженного состояния массива, деформации пород и обрушению кровли камер. Состояние горного массива во многом зависит от применяемых систем ПСВ. Очистные камеры ПСВ обрабатываются секторами вокруг добычной скважины. Отработка секторов ведется гидроразрывом рабочей жидкости горных пород с углами раскрытия  $\alpha_{\min} \Rightarrow \alpha_{\max}$  при радиусах размыва  $R_{\min} \Rightarrow R_{\max}$  в зависимости от физико-механических свойств пород и устойчивости обнаженной кровли.

**Ключевые слова:** подземное скважинное выщелачивание, уран, механико-математическая модель, деформированное состояние, кровли камер, напряжение, разрушение пород

**Для цитирования:** Орынгожин Е.С., Юсубалиев Р.А., Жексенов М.К., Орынгожа Е.Е., Милетенко Н.А. Механико-математическая модель расчета деформированного состояния кровли камер подземного скважинного выщелачивания урана. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 62-67. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-62-67>.

# A mechanical-mathematical model for calculating the deformed state of the roof of uranium in-situ leaching

Ye. S. Oryngozhin<sup>1,2</sup>, R. A., Yusubaliev<sup>3</sup>, M. K. Djexenov<sup>4</sup>,

Ye. Ye. Oryngoza<sup>5</sup>, N. A. Miletenko<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Institute of mining after D.A. Kunaeva, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup>National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>4</sup>Atyrau university named after H. Dosmukhamedova, Atyrau, Republic of Kazakhstan

<sup>5</sup>G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>6</sup>Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources - IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ e24.01@mail.ru

**Abstract.** Uranium is a type of nuclear fuel and is considered a strategic material for military purposes and for ensuring national energy independence. Traditional mining involves extracting ore from the ground, crushing it, and processing it to obtain the desired minerals. In-situ leaching (ISL) technology, also known as solution mining, leaves the ore in situ and pumps liquids through it to leach the minerals.

This article presents a mechanical and mathematical model for calculating the deformation state of the roof of uranium ISL chambers. During underground mining using the ISL method, the eroded rock mass experiences a complex set of alternating stresses and strains, leading to rock displacement and fracture. The formation of ISL chambers during erosion of a sedimentary rock mass leads to a disruption of the original stress state of the mass, rock deformation, and roof collapse of the chambers. The ISL cleaning chambers are developed in sectors around the production well. The sectors are developed by hydraulically flushing the rock with working fluid at opening angles of  $\alpha_{\min} \Rightarrow \alpha_{\max}$ , with washout radii of  $R_{\min} \Rightarrow R_{\max}$ , depending on the physical and mechanical properties of the rock and the stability of the exposed roof.

**Keywords:** In-situ leaching, uranium, mechanical-mathematical model, deformed state, chamber roofs, stress, rock failure

**For citation:** Oryngozhin Ye.S., Yusubaliev R.A., Jexenov M.K., Oryngoza Ye.Ye., Miletenko N.A. A mechanical-mathematical model for calculating the deformed state of the roof of uranium underground leaching chambers. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 62-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-62-67>.

## Введение

Уран является одним из видов топлива для ядерной энергетики и рассматривается как стратегический материал для военных целей и обеспечения энергетической независимости страны. Традиционный способ добычи заключается в извлечении руды из недр, ее дроблении и обработке для получения искоемых минералов. В технологии подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), также известного как добыча растворением, руда остается на месте залегания, и через нее прокачиваются жидкости для выщелачивания минералов [1]. Совершенно очевидно, что возможности способа подземного скважинного выщелачивания еще далеко не раскрыты, применение его сегодня основано в первую очередь на сравнительно небольшом практическом опыте предыдущих лет. Метод подземного скважинного выщелачивания является наиболее привлекательным способом добычи урана с точки зрения упрощенности технологических операций (рис. 1).

Разработка любого гидрогенного месторождения урана осуществляется наиболее простым, высокоэффективным и оригинальным методом подземного скважинного выщелачивания урана.

При подземной разработке полезных ископаемых методом ПСВ размываемый массив горных пород испытывает комплекс переменных напряжений и деформаций, приводящих к сдвигу и разрушению пород. Образование камер ПСВ при размыве массива осадочных пород приводит к нарушению исходного напряженного состояния массива,

деформации пород и обрушению кровли камер. Состояние горного массива во многом зависит от применяемых систем ПСВ. Очистные камеры ПСВ отрабатываются секторами вокруг добычной скважины. Оработка секторов ведется гидроразрывом рабочей жидкости горных пород с углами раскрытия  $\alpha_{\min} \Rightarrow \alpha_{\max}$  при радиусах размыва  $R_{\min} \Rightarrow R_{\max}$  в зависимости от физико-механических свойств пород и устойчивости обнаженной кровли.

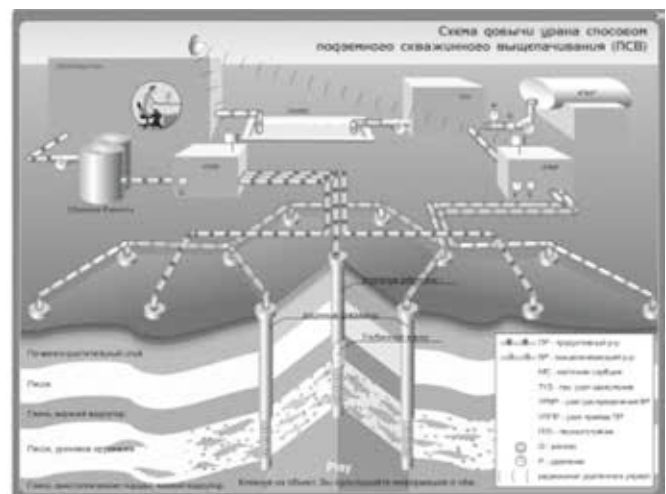


Рис. 1. Метод подземного скважинного выщелачивания добычи и технологические операции /

Fig. 1. In-situ leaching method and process operations

**Цель исследования.** Исследование механико-математической модели для расчета деформированного состояния кровли урановой камеры ПСВ проводится в условиях комплекса знакопеременных напряжений и деформаций, приводящих к перемещению и разрушению горных пород.

### Методология

В практике ПСВ размыв камер ведется непрерывно вплоть до обрушения. Это позволяет определять не предельную по времени величину устойчивости кровли, а предельно допустимую величину пролета. При этом требования к запасу прочности кровли могут быть снижены [2].

Вмещающими породами при отработке залежей полезных ископаемых методом ПСВ являются толщии галечников, конгломератов, песчано-глинистых отложений и глин, обладающие упруго-пластическими свойствами с достаточно быстрым переходом от упругих деформаций к деформациям ползучести [3].

Зависимость между напряжениями и деформациями является линейной в зоне упругости (участок от 0 до X), следовательно,  $G_x = E\epsilon_x$  (E – модуль Юнга,  $\epsilon_x$  – деформация).

В пределах участка XY горная порода при увеличении нагрузки ведет еще себя как упругое тело (остаточной деформации не наблюдается). Точка Y есть предел упругости.

Частное от деления скорости изменения напряжения на скорость изменения деформации в любой точке отрезка XY есть модуль упругости ( $\frac{dG_x}{d\epsilon_x}$ ).

При дальнейшем росте нагрузки (участок Y–X) в породе возникают остаточные деформации (порода переходит в стадию пластической деформации). Дальнейшее нарастание нагрузки вызывает пластическое течение в породе (на участке кривой  $t_\infty$  до точки  $\beta'$ ). При дальнейшем росте нагрузки и достижении времени  $t_3$  (точка  $\beta'$ ) порода разрушается [4–7].

При ПСВ урана в техногенных горных породах месторождений поведение кровли очистных камер будет проходить через все рассмотренные состояния вплоть до обрушения.

Схема к росту устойчивости обнажений кровли очистных камер ПСВ при секторном размыве рабочей жидкости приведена на рисунке 2 [8–11].

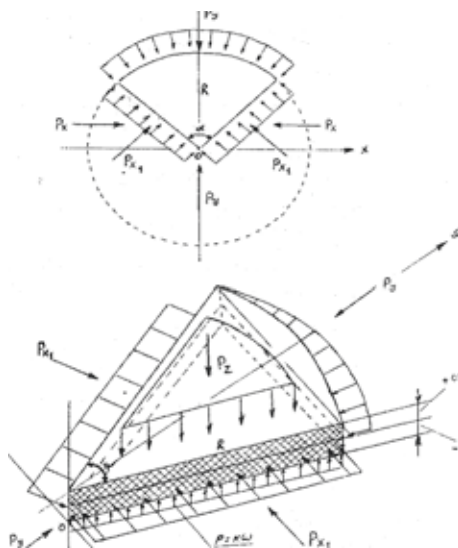


Рис. 2. Схема к расчету устойчивости кровли очистных камер подземного скважинного выщелачивания /  
Fig. 2. Scheme for calculating the stability of the roof of the ISL treatment chambers

При разработке методики расчета предельно допустимого пролета обнажения кровли камер ПСВ за основу принято положение о совместности работы всех элементов камеры как единой совокупности взаимодействующих элементов. Исходя из этого принимается механико-математическая модель в виде секторной плиты площадью  $S_{сек} = \frac{1}{360} \pi R^2 \alpha$ , опирающейся по контуру на упругое основание (еще не размытый массив) и подверженной действию поперечной нагрузки  $P_z = \frac{1}{360} \pi R^2 \alpha \gamma H$  и боковым усилиям  $P_{x1}, P_y$ , где  $P_{x1} = P_x \sin \frac{\alpha}{2}$ .

### Результаты исследований

Как показали результаты экспериментов, выбранная модель позволяет для расчета напряженно-деформированного состояния кровли сектора очистной камеры использовать положение теории пластин.

При этом принимается, что деформирование кровли происходит в области 0Y до наступления пластической деформации, после наступления которой кровля практически теряет устойчивость и через определенное время разрушается.

Тогда для описания взаимосвязи реактивных усилий R упругое основания по контурам обнажения кровли и прогибов  $\omega$  потолочины кровли будет справедлива гипотеза Винклера [12–14]:

$$P_{реак}(x,y) = K\omega(x,y), \quad (1)$$

где K – коэффициент постели (модуль) основания.

Коэффициент постели с учетом неравномерной деформации опорных целиков (массива) по контуру сектора получается в виде

$$K = \frac{E}{(1-2\mu)h} (\lambda_1 + \frac{1-2\mu}{1-\mu^2} \lambda_2), \quad (2)$$

где E – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона; h – высота очистной камеры;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – отношение опорных площадей, работающих в объемном (у точки 0) и плоском напряженном состоянии (по сторонам сектора).

При определении изгиба потолочины (по оси X) полагаем, что плита на целики опирается шарнирно, тогда дифференциальное уравнение изогнутой поверхности потолочины кровли сектора в этих условиях принимает вид

$$D \nabla^2 \omega = P_z - K\omega \pm P_{x1} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} \pm P_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где D – жесткость плиты потолочины (в цилиндрических координатах)  $D = Eh_n / 12 (1 - \mu^2)$ ,

$h_n$  – толщина плиты;

$\nabla^2$  – оператор Лапласа ( $\frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} \pm P_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0$  – уравнение Лапласа);

$\omega$  – прогиб плиты потолочины;  $P_z$  – поперечная нагрузка на потолочину;

$P_{x1}$  и  $P_y$  – усилия в срединной плоскости плиты потолочины:

$$P_{x1} = \int_{-0,5h_n}^{+0,5h_n} G_2 dz; \quad P_y = \int_{-0,5h_n}^{+0,5h_n} G_3 dz, \quad (4)$$

где  $G_2$  и  $G_3$  – горизонтальные напряжения в массиве горных пород.

Далее через полученный прогиб по известным условиям определяется напряжение в потолочине при изгибе.

Граничные условия устойчивости потолочины при длине  $R$  обнаженного пролета по оси  $X$ :

$$[G_{X_1}] \geq G_{X_1}; \quad [G_y] \geq G_y; \quad [G_z] \geq G_z. \quad (5)$$

Допустимый пролет  $R_{\text{доп}}$  определяется условиями (4).

Нормальные напряжения в потолочине по плоскости контакта с опорами в зависимости от действующей нагрузки  $P_z$ , усилий  $P_{X_1}$  и  $P_y$ , радиуса размыва горной породы  $R$  и длины хорды  $\ell$  сектора очистной камеры имеют вид

$$\begin{aligned} G_{X_1} &= AB \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{m^2}{\ell^2} + \mu \frac{n^2}{R^2} \right); \\ G_y &= AB \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \mu \frac{m^2}{\ell^2} + \frac{n^2}{R^2} \right); \\ G_z &= \frac{P_z}{2} \left[ 1 - \frac{16}{\pi^2} B \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{m^2}{\ell^2} + \frac{n^2}{R^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $m$  и  $n$  – целые положительные числа.

$$\begin{aligned} A &= \frac{96P_z}{\pi h_n^2}; \\ B &= \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn \left[ \left( \frac{m^2}{\ell^2} + \frac{n^2}{R^2} \right)^2 \pm \frac{1}{\pi^2 D} \left( P_{X_1} \frac{m^2}{\ell^2} + P_y \frac{n^2}{R^2} \right) + \frac{R}{\pi^4 D} \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Оценивая вероятность обрушения кровли камер ПСВ до окончания работ по извлечению полезного ископаемого, можно предположить, что разрушение не произойдет при вероятности  $e^{-KR^2}$ , где  $K$  – константа, зависящая от величины напряжений и свойств горной породы;  $R$  – радиус размыва камеры.

Вероятность того, что обрушение кровли не произойдет нигде по длине обнажения, можно записать в виде

$$Q = \lim_{\Delta \ell \rightarrow 0} \prod_{\ell=R}^{\ell=\infty} \left[ \int_{\frac{R^2}{\ell^2}}^{\infty} \rho(s) ds \right]^{2\pi \ell \cdot \Delta \ell} \quad (8)$$

или

$$\ln Q = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} 2\pi \ell \left[ \ln \int_{\frac{R^2}{\ell^2}}^{\infty} \rho(s) ds \right] d\ell, \quad (9)$$

где  $\ell$  – расстояние от оси потолочины;

$\tau \left( \frac{R}{\ell} \right)^2$  – касательное напряжение в точке на расстоянии  $\ell$  от оси.

Предположим, что  $\rho(s)$  – плотность вероятности, разлагается в степенной ряд, тогда  $\ln Q$  можно записать в виде [14–16]:

$$\begin{aligned} \ln Q &= \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} 2\pi \ell \left[ \ln \int_{\frac{R^2}{\ell^2}}^{\infty} \sum R_i s^i ds \right] d\ell = \\ &= \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} 2\pi \ell \ln \left[ 1 - \int_0^{\frac{R^2}{\ell^2}} \sum R_i s^i ds \right] d\ell = \\ &= \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} 2\pi \ell \ln \left[ 1 - \sum R_i \rho^{i+1} \frac{R^{2i+2}}{\ell^{2i+2}} \right] d\ell. \end{aligned} \quad (10)$$

Так как  $\ln(1-x)$  можно разложить в ряд:

$$-x - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 - \dots - \frac{1}{n}x^n,$$

где  $x$  – меньше единицы, то можно записать:

$$\begin{aligned} \ln Q &= - \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} 2\pi \ell \sum \beta_i \rho^i \frac{R^{2i}}{\ell^{2i}} d\ell = \\ &= -2\pi \left[ \sum \frac{\beta_i \rho^i R^{2i}}{(2i-2)\ell^{2i-2}} \right]_{R_{\min}}^{R_{\max}} = -2\pi AR^2; \\ Q &= e^{-2\pi AR^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где константа  $A$  является некоторой функцией  $R$  и коэффициентов разложения  $\rho(s)$ . Это показывает, что вероятность того, что кровля камеры радиуса размыва  $R$  не обрушится, равна  $e^{-KR^2}$ .

## Выводы

Механико-математическая модель решения объемной задачи напряженно-деформированного состояния кровли очистной камеры ПСВ для определения допустимых пролетов обнажения кровли основана на положениях теории плит. Решение дифференциального уравнения, предложенного для описания изогнутой поверхности потолочины сектора очистной камеры, с использованием двойного тригонометрического ряда позволяет через полученный прогиб по принятым для кровли граничным условиям определить напряжения, возникающие в потолочине при изгибе и по ним устанавливать допустимый пролет обнажений кровли.

Приложение теории вероятностей к решению проблемы определения устойчивости (до разрушения) обнаженных пролетов кровли камер ПСВ дает возможность определить вероятность того, что разрушение кровли не произойдет. В этом случае вероятность должна быть равна  $e^{-kR^2}$  ( $k$  – константа, зависящая от величины напряжения и свойств породы;  $R$  – радиус размыва породы).

Выполненные расчеты параметров гидромониторных струй рабочей жидкости подтвердили правомерность полученных теоретических зависимостей о связи параметров размыва пород с параметрами давления на насадке гидромонитора, параметрами диаметра насадки и расстояния от насадки до забоя. В процессе гидротранспортирования отбитой горной массы по днищу очистной камеры ПСВ скорость трогания частиц, взвешивания и оседания связаны с глубиной и масштабом турбулентности потока воды в отбойной волне. Подъемная сила мелких частиц, переходящих во взвешенное состояние, пропорциональна квадрату скорости потока. Про-

изводительность гидротранспортирования пульпы от забоя к зумпфу зависит от параметров размыва горной массы и в пределах радиусов размыва  $3,5 \leq R \leq 8$  м аппроксимируется прямопропорциональной зависимостью. Производитель-

ность эрлифтного подъема пульпы функционально связана с величиной погружения всасывающей линии эрлифта в зумпф, скоростью движения пульпы и потерями напора на всасывающей и нагнетательной линиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: учебник для вузов: в 2 томах. 2006; 1: 417. Avdokhin V.M. Fundamentals of Mineral Beneficiation. Textbook for Universities: In 2 Volumes. Moscow, 2006; 1: 417. (In Russ.).
2. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация и управление. Москва, 1981: 343. Lynch A.J. Crushing and Grinding Cycles. Modeling, Optimization, and Control: Translated from English. Moscow, 1981: 343. (In Russ.).
3. Лазарева О.В., Подкаменный Ю.А. Автоматизированный способ управления комплексом измельчения и классификации алмазосодержащих руд. *Вестник ИргТУ*. 2014; 4: 128-133. Lazareva O.V., Podkamenny Yu.A. Automated Method for Controlling a Complex for Grinding and Classifying Diamond-Bearing Ores. *Vestnik of IrSTU*. 2014; 4: 128-133. (In Russ.).
4. King R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann, 2001: 404.
5. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., et al. Radiometric sorting of ore in uranium leaching. *Eurasian Mining*. 2025; 1: 91-94. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2425/article/39738/?language=en>
6. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., et al. Geological aspects of uranium deposits for in-situ leaching application to develop energy potential of Kazakhstan. *Eurasian Mining*. 2024; 2: 19-22. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2364/article/38888>.
7. Цой С.В., Жусупбеков С.С. Основы разработки гидrogenных месторождений урана. Алматы, 2016: 320. Tsoi S.V., Zhushupbekov S.S. Fundamentals of Development of Hydrogenetic Uranium Deposits. Almaty, 2016: 320. (In Russ.).
8. 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>.
9. Бабашева М.Н. Экспериментальное обоснование технологии водогазового воздействия на пласт в осложненных горно-геологических условиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Атырау: [б. и.], 2017. 24 с. Babasheva M.N. Experimental justification of water-gas stimulation technology in complex mining and geological conditions. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Atyrau: [b. i.], 2017. 24 p.
10. Вафин Р.В., Зарипов М.С., Алексеев Д.Л., Буторин О.И., Сагитов Д.К. Техно – технологические системы реализаций водогазового воздействия на пласты. *Нефтепромышленное дело*. 2014; 6: 55-68. Vafin R.V., Zaripov M.S., Alekseev D.L., Butorin O.I., Sagitov D.K. Technical and technological systems for implementing water-gas stimulation of formations. *Neftepromyslovoe delo*. 2014; 6: 55-6.
11. Узье О., Витур Д., Фьяр О. Анализ динамических потоков. Выпуск 5.10.01, 2018. 359 с. Uzier O., Vitura D., Fjare O. Dynamic Flow Analysis. Issue 5.10.01, 2018. 359 p.
12. Реферат «Причины коломатации призабойной зоны скважин при первичном вскрытии», Москва, 2010. Abstract "Causes of colmatation of the bottomhole zone of wells during primary opening", Moscow, 2010.
13. Капырин Ю.В., Таратын М.Э., Храпова Е.И. Способ вторичного вскрытия пласта. Патент РФ № 2160827, 20.12.2020. Kapyrin Yu.V., Taratyn M.E., Khrapova E.I. Method of secondary opening of a formation. Russian Federation Patent No. 2160827, 20.12.2020.
14. Kazatomprom. URL: <http://kazatomprom.kz/ru/pages/metod.pv>.
15. Щадов М.И., Артемьев В.Б. и др. Природный потенциал ископаемых углей. Рациональное использование их органического вещества. Москва, 2000; 2: 202. Shchadov M.I., Artemyev V.B., et al. Natural potential of fossil coals. Rational use of their organic matter. Moscow: Nedra, 2000; 2: 202. (In Russ.).
16. Шестаков В.А. Проектирование горных предприятий: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, 2003: 96 с. Shestakov V.A. Design of mining enterprises: Textbook for universities. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, 2003. 96 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ерназ Советович Орынгожин –**

д-р техн. наук, КазНУ им. Аль-Фараби, главный научный сотрудник ИГД им. Д.А. Кунаева, г. Алматы, Республика Казахстан

**Ренат Асылбекович Юсубалиев –**

соискатель, Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан; <https://orcid.org/0000-0001-8993-9986>

**Махамбет Кудайбергенович Джексенов –**

канд. географ. наук, Атырауский университет имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика Казахстан; <https://orcid.org/0000-0002-1741-3931>

## ABOUT THE AUTHORS

**Yernaz S. Oryngozhin –**

Dr. Sci. (Eng.), Al-Farabi Kazakh National University, Chief Researcher at the Institute of Mining named after D.A. Kunaev, Almaty, Republic of Kazakhstan

**Renat A. Yusubaliev -**

Surveyor, National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan; <https://orcid.org/0000-0001-8993-9986>

**Makhambet K. Djexenov -**

Cand. Sci. (Geography), Atyrau university named after H. Dosmukhamedova, Atyrau, Republic of Kazakhstan; <https://orcid.org/0000-0002-1741-3931>

**Ералы Ерназулы Орынгожа –**

докторант PhD, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан;  
e-mail: e24.01@mail.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-9130-0994>

**Наталья Александровна Милетенко – канд. техн.**

наук, старший научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация;  
<https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

**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: 14.05.2026  
Поступила после рецензирования: 29.05.26  
Принята к публикации: 10.06.2026

**Yeraly Ye. Oryngoza –**

PhD doctoral student, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan;  
e-mail: e24.01@mail.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-9130-0994>

**Natalya A. Miletenko -**

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

**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: 14.05.2026  
Revised: 29.05.26  
Accepted: 10.06.2026

## Анализ и перспективы интеграции современных методов дистанционного геодезического мониторинга техногенных объектов

Е. В. Кайгородова<sup>1,2✉</sup>, М. С. Тутанова<sup>1,2</sup>, О. В. Старостина<sup>2</sup>, А. М. Капшук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск,

Российская Федерация

<sup>2</sup>Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

✉ [yevgeniya\\_kaygorodova@mail.ru](mailto:yevgeniya_kaygorodova@mail.ru)

**Резюме.** Рост масштабов горных работ и техногенной нагрузки на геологическую среду обуславливает необходимость обеспечения безопасности сложных инженерных сооружений, таких как карьеры и отвалы. Целью данной работы является анализ современного состояния, выявление проблем и определение перспективных направлений развития дистанционных методов геодезического мониторинга техногенных объектов. В процессе исследования проведены обзор и сравнительный анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных применению спутниковых технологий (GNSS), наземного лазерного сканирования (НЛС), беспилотных авиационных систем (БАС) и спутниковой радарной интерферометрии (InSAR). В результате анализа установлено, что каждый из рассмотренных методов обладает специфическими преимуществами и ограничениями. GNSS обеспечивает высокую точность, однако характеризуется дискретным характером наблюдений. НЛС позволяет получать высокоточные цифровые данные о геометрии всей видимой поверхности объекта, оно ограничено диапазоном измерений и зависит от условий выполнения съемки. БАС обеспечивают детализированную площадную информацию, однако имеют ограничения по периодичности наблюдений и точности результатов. InSAR позволяет проводить ретроспективный анализ деформационных процессов, но подвержено влиянию атмосферных и геометрических искажений. Проведенный анализ показывает, что ни один из рассматриваемых методов не является универсальным. Главным выводом является необходимость перехода от использования отдельных технологий к их комплексной интеграции.

**Ключевые слова:** техногенный объект, геодезический мониторинг, дистанционные методы, комплексная интеграция, спутниковая интерферометрия, беспилотные авиационные системы, лазерное сканирование, цифровые данные

**Для цитирования:** Кайгородова Е.В., Тутанова М.С., Старостина О.В., Капшук А.М. Анализ и перспективы интеграции современных методов дистанционного геодезического мониторинга техногенных объектов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 68-73. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-68-73>.

## Analysis and prospects for the integration of modern methods of remote geodetic monitoring of man-made structures

E. V. Kaygorodova<sup>1,2✉</sup>, M. S. Tutanova<sup>1,2</sup>, O. V. Starostina<sup>2</sup>, A. M. Kapshuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

✉ [yevgeniya\\_kaygorodova@mail.ru](mailto:yevgeniya_kaygorodova@mail.ru)

**Abstract.** The increasing scale of mining operations and anthropogenic impact on the geological environment make it necessary to ensure the safety of complex engineering structures such as open pits and spoil heaps. Deformation processes at these sites are highly dynamic and require rapid and accurate monitoring of their spatial position. Therefore, improving geodetic monitoring methods remains a priority research and practical task. This study aims to analyse the current state of remote geodetic monitoring methods for technogenic objects, identify their limitations, and determine promising directions for further development. A review and comparative analysis of domestic and international publications was carried out for satellite technologies, ground-based laser scanning (GLS), unmanned aerial systems, and satellite radar interferometry. The analysis showed that each method has specific advantages and limitations. GNSS provides high accuracy but is limited to discrete observation points. GLS delivers high-precision digital data for the

visible surface of an object but is constrained by measurement range and survey conditions. UAS provide detailed areal information but are limited by observation frequency and accuracy. InSAR enables retrospective deformation analysis but is affected by atmospheric and geometric distortions. None of the considered methods is universal; therefore, their integrated application is the most promising direction.

**Keywords:** technogenic object, geodetic monitoring, remote sensing methods, comprehensive integration, satellite interferometry, unmanned aerial vehicles, laser scanning, digital data

**For citation:** Kaygorodova E.V., Tutanova M.S., Starostina O.V., Kapshuk A.M. Analysis and prospects for the integration of modern methods of remote geodetic monitoring of man-made structures. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 68-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-68-73>.

## Введение

Современный этап развития горнодобывающей промышленности и инфраструктурного строительства характеризуется углублением карьеров, ростом объемов отвалов и усложнением инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений. Техногенные объекты, представляющие собой результат активного вмешательства человека в геологическую среду, подвержены интенсивным деформационным процессам, которые могут приводить к катастрофическим последствиям: обрушениям бортов, оползням и просадкам. В этой связи геодезический мониторинг, позволяющий оперативно и с высокой точностью фиксировать изменения пространственного положения объектов, становится обязательным элементом системы обеспечения промышленной и экологической безопасности.

Несмотря на развитие инструментальных и дистанционных методов наблюдений, остаются нерешенными вопросы выбора оптимального комплекса технологий, сопоставимости результатов измерений и повышения достоверности интерпретации деформационных процессов.

**Цель работы:** анализ современного состояния и тенденций развития дистанционных методов геодезического мониторинга техногенных объектов, выявление их преимуществ и недостатков, а также обоснование перспективных направлений интеграции данных для повышения достоверности контроля деформационных процессов.

## Задачи исследования:

1. Выполнить обзор и систематизацию отечественных и зарубежных публикаций по теме исследования.
2. Провести сравнительный анализ основных дистанционных методов (НЛС, БАС, InSAR) по ключевым критериям (точность, пространственное покрытие, периодичность, стоимость).
3. Выявить актуальные проблемы и определить направления дальнейших исследований в области интеграции данных мониторинга.

## Материал и методы исследования

В настоящее время в рамках современного геодезического мониторинга техногенных объектов представлен широкий спектр различных методов и технологий, которые можно классифицировать по различным направлениям.

Выполненный анализ отечественных и зарубежных источников [1–3] позволяет условно идентифицировать две основные группы методов: геометрические и дистанционные. Геометрические методы подразумевают определение координат и перемещений точек объекта, к которым следует отнести нивелирование, полигонометрию, триангуляцию, спутниковые измерения (GNSS). Методы дистанционного

мониторинга обеспечивают получение данных при отсутствии непосредственного контакта с объектом. К данным методам относится лазерное сканирование, фотограмметрия (в том числе с БАС), радарная интерферометрия и тепловизионная съемка.

Методической основой исследования явился сравнительно-аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных применению GNSS, НЛС, БАС и InSAR в задачах мониторинга техногенных объектов. При отборе источников учитывались тематическая релевантность, наличие сведений о точностных характеристиках методов и примерах их практического применения. Сопоставление методов выполнялось по следующим критериям: точности результатов, пространственному охвату, оперативности получения данных, возможности автоматизации, ограничению применения и экономическим аспектам.

## Результаты исследований

### Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS)

В настоящее время геодезический мониторинг с применением GNSS-измерений позволяет в любой момент получить координаты в глобальной системе отсчета с достаточно высокой точностью. При GNSS-методе различают два режима наблюдений: статический и кинематический.

В статическом режиме выполняется продолжительная (от нескольких часов до суток) регистрация спутникового сигнала в наблюдаемой точке с последующей постобработкой (рис. 1). Применение этого режима может обеспечивать миллиметровый уровень точности при благоприятных условиях наблюдений и корректной постобработке. Статический режим используется преимущественно в целях создания опорных геодезических сетей, а также для наблюдений за длительными деформационными процессами.



Рис. 1. Производство GNSS-измерений на открытых горных работах /  
Fig. 1. GNSS measurements in open-pit mining operations

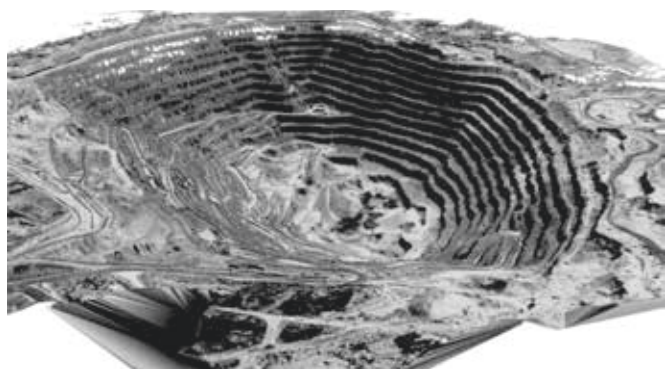
Кинематические измерения в режиме реального времени RTK (Real-Time Kinematic) позволяют оперативно опре-

делять координаты наблюдаемых точек непосредственно в процессе измерений. В исследованиях [4] представлено совместное применение различных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), что повышает точность определения координат при ограниченной видимости особенно в глубоких карьерах.

Помимо очевидных преимуществ, спутниковые измерения обладают существенным ограничением, так как позволяют проводить мониторинговые наблюдения лишь в фиксированных наблюдательных пунктах, оборудованных для выполнения GNSS-измерений. Следовательно, неконтролируемыми оказываются участки прибортовых массивов между наблюдательными пунктами. Указанное ограничение может быть частично компенсировано за счет интеграции GNSS-мониторинга с методами площадного покрытия, например с радарной интерферометрией или лазерным сканированием.

### **Наземное лазерное сканирование**

Технология наземного лазерного сканирования (рис. 2) подразумевает получение трехмерных координат множества точек объекта с высокой скоростью и плотностью. По мнению [5], данный метод существенно расширил возможности площадного мониторинга, так как теперь появилась возможность выполнять мониторинг всей поверхности исследуемого объекта, а не отдельных его точек.



**Рис. 2.** Цифровая модель местности карьера, полученная в результате лазерного сканирования /  
**Fig. 2.** DSM quarry obtained as a result of laser scanning

Преимущественные характеристики технологии наземного лазерного сканирования (выявленные на основе работ [6, 7] и зарубежных исследователей [8, 9]):

1. Высокая степень детализации – НЛС позволяет получить большое количество (несколько миллионов) точек с высокой точностью позиционирования (от 2 до 5 мм при благоприятных условиях и на ограниченных расстояниях).
2. Сплошной характер съемки – есть возможность фиксации всей видимой поверхности объекта, что дает возможность выявить локальные деформации, такие как трещины и вывалы, которые можно пропустить, выполняя точечные измерения.
3. Высокая производительность – всего несколько часов может потребоваться для выполнения полного сканирования какого-либо сложного объекта.
4. Объективность – полученное в результате НЛС облако точек представляет собой полное пространственно-детализированное цифровое представление объекта, которое используется для анализа смещений.

Несмотря на описанные преимущества, у данного метода все же есть недостатки. В первую очередь это дорогостоящая аппаратура и затруднительная камеральная обработка таких объемных массивов информации. К тому же ограничен диапазон сканирования: для производства точных измерений расстояние до сканера не должно превышать 500–1000 м, а для этого на крупных объектах необходима не одна станция установки лазерного оборудования. По результатам исследований [9], применение лазерного сканера в сложных метеорологических условиях (пыль, туман, осадки) приводит к снижению точности полученных цифровых данных.

В своей работе [7] выполнил сравнительную оценку потенциала технологии наземного лазерного сканирования и GNSS-методики, где подробно представлена информация об отсутствии конкуренции данных методов, ведь они, наоборот, могут использоваться в рамках единой системы наблюдений.

### **Беспилотные авиационные системы как инструмент дистанционного мониторинга**

В настоящее время геодезический мониторинг с применением беспилотных авиационных систем считается одним из наиболее активно развивающихся направлений геодезического мониторинга (рис. 3).



**Рис. 3.** Применение беспилотных авиационных систем на открытых горных работах /  
**Fig. 3.** Application of UAS in open-pit mining

По мнению [10], оперативность, детализация, а также экономическая эффективность этого метода позволили занять определенный сегмент между космической съемкой и наземными технологиями. В исследованиях авторов [10–13] идентифицируется два основных направления применения беспилотных авиационных систем для наблюдений за техногенными объектами: фотограмметрическая съемка и лазерное сканирование с БАС.

Фотограмметрическая съемка с БАС обеспечивает получение серии перекрывающихся изображений, на основе которых формируются плотные облака точек, цифровые модели поверхности и ортофотопланы. Метод лазерного сканирования с БАС (UAV-LiDAR) удачно совмещает в себе мобильность дрона с точностью лазера. Исследования авторов [8] наглядно обосновывают продуктивность данного метода именно для сложных техногенных объектов, ведь луч сканера имеет способность частично преодолевать растительный покров, что обеспечивает получение данных о рельефе залесенных участков.

Преимущественные характеристики технологии UAV-LiDAR по сравнению с наземными – оперативный мони-

торинг обширных территорий, безопасность (исключается присутствие человека на опасном участке), высокая скорость сбора информации.

Автор [11] выделяет основные недостатки данного метода:

1. Зависимость от неблагоприятных метеорологических условий – резкий и сильный ветер, наличие осадков и низкой облачности может сделать выполнение полета невозможным или существенно снизить качество данных.

2. Временное ограничение полета – БАС мультироторного типа может находиться в полете от 20 до 40 минут, поэтому необходимо правильно составить маршрут для дрона.

3. Потребность в оформлении разрешения на полет, особенно в непосредственной близости к промышленным объектам и в пограничных зонах.

4. Трудоемкость камеральной обработки полученных объемов цифровых данных. За один полет может быть израсходовано несколько десятков гигабайт.

5. Зависимость от качества геодезической привязки. Плотность четко опознаваемых и равномерно распределенных опорных точек должна составлять не менее 6–8 на км<sup>2</sup>, погрешность определения координат X, Y, Z – не более 1–2 см. В противном случае погрешность конечных полученных моделей возрастет до 20–50 см, что существенно снижает возможность использования метода для регистрации малых деформационных смещений.

#### *Спутниковая радарная интерферометрия*

Перспективным дистанционным методом мониторинга деформаций земной поверхности является спутниковая радарная интерферометрия (InSAR), которая базируется на вычислении разности фаз между радарными снимками одной территории, полученными в разное время (рис. 4).



Рис. 4. Изображение интерферограммы карьера /  
Fig. 4. Image of the quarry interferogram

Сущность метода состоит в том, что два SAR-снимка одной местности, выполненные с разных орбитальных позиций, накладываются друг на друга. В результате получают новый продукт – интерферограмму. Если в период между съемками произошли смещения земной поверхности, расстояние от спутника до нее изменится. По разности фаз сигналов полученной интерферограммы определяется разница в расстоянии. Сопоставление фаз радиолокационных сигналов от повторных съемок позволяет выявлять малые смещения земной поверхности.

Обзор работ [14, 15] классифицирует основные преимущества метода:

1. Масштабный охват территории – метод InSAR характеризуется широкой полосой захвата территориями в несколько сотен км<sup>2</sup>.

2. Высокая точность измерений – при оптимальных условиях съемки методика позволяет регистрировать деформационные смещения с миллиметровой погрешностью.

3. Анализ ретроспективных данных – наличие доступа к многолетним архивам спутниковой съемки за последние 10–20 лет дает возможность восстановить хронологию деформаций.

4. Полная автономность метода – не требуется полевого оснащения в виде марок или отражателей.

Ограничения InSAR-метода:

1. Нарушение когерентности – высокая растительность и значительный снежный покров приводят к декорреляции, то есть происходит полная или частичная потеря устойчивости сигнала во времени.

2. Влияние атмосферных условий – флуктуации влажности и атмосферного давления искажают радиолокационный сигнал, что снижает достоверность результатов измерений.

3. Искажения рельефа – сложный рельеф порождает специфические радиолокационные артефакты, то есть тени, опрокидывание изображения (layover), сжатие склонов (foreshortening), что приводит к затруднению для корректной обработки снимков.

4. Ограниченная размерность измерений – данный метод фиксирует компонент смещения по линии визирования спутника (направление спутник – Земля), что делает необходимой дополнительную обработку или привлечение сторонних данных для разложения вектора сдвига на вертикальную и горизонтальную компоненты.

В работах [4] представлен сопоставительный анализ GNSS- и InSAR-методов на индустриальной территории, где результаты расходятся всего на 2–3 мм.

#### **Обсуждение результатов**

Выполненный анализ методов геодезического мониторинга техногенных объектов позволяет сопоставить эффективность данных методов и оценить целесообразность их применения в задачах мониторинга карьеров и отвалов. Результаты анализа продемонстрированы в таблице.

Анализ дистанционных методов геодезического мониторинга техногенных объектов позволяет выделить наиболее перспективные сочетания, основанные на взаимном дополнении по таким ключевым особенностям, как точность, территориальный охват, оперативность, всепогодность, стоимость и ограничения:

InSAR + БАС-фотограмметрия – метод представляется перспективным при многоуровневой организации мониторинга: спутниковые данные позволяют выявлять зоны вероятной деформационной активности на больших территориях, а БАС обеспечивает детализированное обследование локальных участков и уточнение морфологических признаков деформаций.

БАС-фотограмметрия + UAV LIDAR – гибридная съемка с одного носителя: LIDAR позволяет получать информацию о рельефе даже при наличии частичного растительного покрова, что дает возможность получить качественную цифровую модель местности; фотограмметрия выполняет визуализацию объекта, распознает текстуру и даже цвет объекта.

НЛС + БАС-фотограмметрия – сочетание методов снижает вероятность образования неохваченных участков и повышает полноту трехмерного описания объекта. НЛС способствует получению данных нижней части объекта с миллиметровой точностью, БАС – верхней части.

GNSS + InSAR – GNSS-метод предоставляет абсолютные координаты опорных точек, спутниковый метод – поле смещений большого количества точек, что позволяет сопостав-

**Сравнительный анализ методов мониторинга для карьеров и отвалов /  
Comparative analysis of monitoring methods for open pits and stockpiles**

| Критерий                             | GNSS                     | НЛС                         | БАС-фотограмметрия           | InSAR                                     |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| Точность определения смещений        | Высокая (мм)             | Высокая (мм-см)             | Средняя (см)                 | Высокая (мм/см)                           |
| Пространственное покрытие            | Точечное                 | Площадное                   | Площадное                    | Площадное                                 |
| Частота наблюдений                   | Непрерывно               | Высокая                     | Периодическая / по запросу   | Регулярная (по расписанию спутника)       |
| Возможность ретроспективного анализа | Отсутствует              | Отсутствует                 | Ограничена, если есть архивы | Высокая (архивы 10+ лет)                  |
| Применимость в глубоких карьерах     | Ограничена (экранировка) | Высокая (со дна или бортов) | Высокая                      | Средняя                                   |
| Применимость на отвалах              | Высокая                  | Высокая                     | Высокая                      | Высокая (при наличии отражателей)         |
| Стоимость оборудования / съемки      | Средняя / высокая        | Высокая / средняя           | Низкая / низкая              | Средняя (данные) (отсутствует на объекте) |
| Автоматизация                        | Полная                   | Частичная                   | Частичная                    | Полная (обработка)                        |

лять дискретные высокоточные измерения с распределенным полем смещений и повышать достоверность интерпретации деформационных процессов.

### Заключение

1. Сопоставительный анализ современных методов геодезического мониторинга техногенных объектов показывает, что GNSS-метод сохраняет приоритетное значение в задачах высокоточного и непрерывного контроля деформаций, однако его применение ограничено дискретным характером наблюдений, поскольку измерения выполняются только в фиксированных пунктах.

2. Методы наземного лазерного сканирования и фотограмметрической съемки обеспечивают детализированное площадное представление геометрического состояния объекта и позволяют выявлять локальные деформационные изменения на значительных участках поверхности, однако требуют периодического выполнения съемок и в целом уступают GNSS-наблюдениям по точности регистрации малых смещений.

3. Спутниковая радарная интерферометрия, в свою очередь, обладает существенными преимуществами, связанными с широким территориальным охватом, высокой чувствительностью к деформационным смещениям и возможностью ре-

троспективного анализа. Вместе с тем достоверность интерферометрических определений зависит от влияния атмосферных возмущений, нарушений когерентности и геометрических искажений, что обуславливает необходимость дальнейшей методической проработки применения InSAR, особенно в условиях глубоких карьеров и активно изменяющегося рельефа.

4. Проведенный анализ свидетельствует, что наиболее перспективным направлением развития геодезического мониторинга является интеграция разномасштабных и разнородных данных, а также применение методов машинного обучения для их совместной обработки и интерпретации. Комплексное использование различных технологий позволяет не только частично компенсировать ограничения отдельных методов, но и существенно повысить достоверность, полноту и информативность мониторинга за счет объединения высокоточных точечных и площадных наблюдений в едином информационно-аналитическом контуре.

5. Обобщение результатов анализа научной литературы свидетельствует о наличии ряда взаимосвязанных и недостаточно изученных вопросов: методика совместного применения GNSS и InSAR в условиях активной разработки карьеров, оценка точности InSAR-метода в глубоких карьерах, верификация интерферометрических данных высокоточным нивелированием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Zhang K.A., Chen Y. Review of remote sensing technologies for monitoring the deformation of civil engineering structures. *Remote Sensing*. 2021; 13 (5): 950. <https://doi.org/10.3390/rs13050950>.
2. Lechner A.M., Muir M. Remote sensing technologies for monitoring subsurface infrastructure: A review. *Journal of Infrastructure Systems*. 2021; 27 (3): 04021024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000590](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000590).
3. Хромов Д.В. Инновационные подходы к геодезическому мониторингу. *Научные и практические исследования в геодезии*. 2023; 17 (3): 89-96. Khromov D.V. Innovative approaches to geodetic monitoring. *Scientific and Practical Research in Geodesy*. 2023; 17 (3): 89-96. (In Russ.).
4. Huang Y., Lee C. Monitoring the deformation of urban infrastructure using combined GNSS and InSAR techniques. *Journal of Urban Technology*. 2022; 29 (4): 1-15. <https://doi.org/10.1080/10630732.2021.2005003>.
5. Смирнов В.А., Иванова Е. П. Наземное лазерное сканирование для мониторинга техногенных объектов. *Геодезия и картография*. 2023; 12 (1): 67-75. Smirnov V.A., Ivanova E.P. Terrestrial laser scanning for monitoring of technogenic objects. *Geodesy and Cartography*. 2023; 12 (1): 67-75. (In Russ.).
6. Павлов А.И. Геодезический мониторинг объектов энергетики: современные подходы. *Энергетические технологии и системы*. 2022; 10 (1): 33-39. Pavlov A.I. Geodetic monitoring of energy facilities: modern approaches. *Energy Technologies and Systems*. 2022; 10 (1): 33-39. (In Russ.).
7. Федоров С.Л. Применение 3D-лазерного сканирования для мониторинга инфраструктурных объектов. *Горные науки и технологии*. 2021; 17 (2): 95-102. Fedorov S.L. Application of 3D laser scanning for monitoring of infrastructure objects. *Mining Sciences and Technologies*. 2021; 17 (2): 95-102. (In Russ.).

8. Obermeier S., Döllner J. Integrating 3D laser scanning and UAV data for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*. 2023; 30 (2): 3046. <https://doi.org/10.1002/stc.3046>.
9. Böhm J., Huber J. Laser scanning and UAV technology for the monitoring of historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*. 2023; 23: 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.04.001>.
10. Петров Д.С., Сидоров К.А. БПЛА в мониторинге инфраструктурных объектов. *Научные исследования в геодезии*. 2024; 10 (2): 123-130. Petrov D.S., Sidorov K.A. UAVs in monitoring of infrastructure objects. *Scientific Research in Geodesy*. 2024; 10 (2): 123-130. (In Russ.).
11. Иванова Е.Н. Использование БПЛА для мониторинга экологических изменений. *Экология и геодезия*. 2023; 14 (1): 78-85. Ivanova E.N. Use of UAVs for monitoring of environmental changes. *Ecology and Geodesy*. 2023; 14 (1): 78-85. (In Russ.).
12. Григорьев В.А. Эффективность применения БПЛА для геодезического мониторинга. *Вестник геодезии и картографии*. 2022; 15 (2): 36-42. Grigoriev V.A. Efficiency of using UAVs for geodetic monitoring. *Bulletin of Geodesy and Cartography*. 2022; 15 (2): 36-42. (In Russ.).
13. Иванова Е.Н., Петров С.И. БПЛА в мониторинге крупных инфраструктурных проектов. *Технологии и инновации в строительстве*. 2022; 11 (3): 58-66. Ivanova E.N., Petrov S.I. UAVs in monitoring of large infrastructure projects. *Technologies and Innovations in Construction*. 2022; 11 (3): 58-66. (In Russ.).
14. Müller H., Scherer H. The role of remote sensing in the monitoring of industrial facilities: A review. *Sensors*. 2022; 22 (7): 2582. <https://doi.org/10.3390/s22072582>.
15. Gonzalez A., Pacheco J. Remote monitoring of ground subsidence using UAV and satellite data. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024; 123: 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.112123>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Евгения Владимировна Кайгородова** –  
аспирант, кафедра инженерной геодезии и  
маркшейдерского дела, Сибирский государственный  
университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация;  
м. т. н., старший преподаватель, кафедра МДиГ,  
Карагандинский технический университет имени Абылкаса  
Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан,  
[yevgeniya\\_kaygorodova@mail.ru](mailto:yevgeniya_kaygorodova@mail.ru);

**Мируэрт Серикпаевна Тутанова** –  
аспирант, кафедра инженерной геодезии и  
маркшейдерского дела, Сибирский государственный  
университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация;  
м. т. н., старший преподаватель, заведующая кафедрой  
МДиГ, Карагандинский технический университет имени  
Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан;

**Ольга Васильевна Старостина** –  
канд. техн. наук, доцент кафедры МДиГ, Карагандинский  
технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда,  
Казахстан; [olga.starostina2612@gmail.com](mailto:olga.starostina2612@gmail.com);  
<https://orcid.org/0000-0003-4030-0748>

**Асия Маратовна Капшук** –  
м. т. н., старший преподаватель, кафедра МДиГ,  
Карагандинский технический университет имени Абылкаса  
Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан;

### 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: 12.04.2026  
Поступила после рецензирования: 30.05.2026  
Принята к публикации: 05.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

**Yevgeniya V. Kaigorodova** –  
PhD student, Department of Engineering Geodesy and Mine  
Surveying, Siberian State University of Geosystems and  
Technologies, Novosibirsk, Russian Federation;  
M.Sc., teacher Department of Mine Surveying and Geodesy,  
Abylka Saginov Technical University, Karaganda, Republic of  
Kazakhstan, [yevgeniya\\_kaygorodova@mail.ru](mailto:yevgeniya_kaygorodova@mail.ru);

**Miruert S. Tutanova** –  
PhD student, Department of Engineering Geodesy and Mine  
Surveying, Siberian State University of Geosystems and  
Technologies, Novosibirsk, Russian Federation;  
M.Sc., teacher, Head of Department of Mine Surveying and  
Geodesy, Abylka Saginov Technical University, Karaganda,  
Republic of Kazakhstan;

**Olga V. Starostina** –  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mine  
Surveying and Geodesy Abylka Saginov Technical University,  
Karaganda, Kazakhstan; [olga.starostina2612@gmail.com](mailto:olga.starostina2612@gmail.com);  
<https://orcid.org/0000-0003-4030-0748>

**Asiya M. Kapshuk** –  
M.Sc., teacher Department of Mine Surveying and Geodesy,  
Abylka Saginov Technical University, Karaganda, Republic of  
Kazakhstan;

### 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: 12.04.2026  
Revised: 30.05.2026  
Accepted: 05.06.2026

# Обоснование технологии локального прогноза удароопасности методом естественного электромагнитного излучения в подземных условиях рудника Скалистого Норильского рудного района

С. М. Данильев, О. М. Шнюкова<sup>✉</sup>, Н. А. Данильева

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>✉</sup> Shnyu-olga@yandex.ru

**Резюме.** Рассматривается применение метода естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) для локализации зон, склонных к проявлению опасных геодинамических явлений в условиях подземного рудника Октябрьского месторождения медно-никелевых руд. Целью работы является обоснование методики измерения параметров ЕЭМИ в подземных условиях и определение их критериев для локального прогноза удароопасности в горно-геологических условиях рудника Скалистого.

Для достижения поставленной цели на участке опытно-методических работ произведены измерения ЕЭМИ при помощи аппаратного комплекса «АНГЕЛ-М». Верификация результатов применения метода ЕЭМИ базируется на данных деформационного мониторинга, позволивших подтвердить результаты лабораторных испытаний и апробаций в выработке для обоснования эффективности применения метода при решении задачи локального прогноза удароопасности. В работе приведены результаты измерений параметров ЕЭМИ на участке опытно-методических работ в 2023 и 2026 годах, показана их взаимосвязь с процессами, происходящими в приконтурной части массива.

**Ключевые слова:** Октябрьское месторождение, рудник Скалистый, подземная горная выработка, естественное электромагнитное излучение, деформационный мониторинг, опасные геодинамические явления, локальный прогноз

**Для цитирования:** Данильев С.М., Шнюкова О.М., Данильева Н.А. Обоснование технологии локального прогноза удароопасности методом естественного электромагнитного излучения в подземных условиях рудника Скалистого Норильского рудного района. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 74-79. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-74-79>.

## Justification of the technology of local impact hazard prediction using natural electromagnetic radiation in the underground conditions of the Skalisty mine in the Norilsk ore district

S. M. Daniliev, O. M. Shnyukova<sup>✉</sup>, N. A. Danilieva

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>✉</sup> Shnyu-olga@yandex.ru

**Abstract.** This article discusses the application of the natural electromagnetic radiation (EMR) method for localizing zones prone to dangerous geodynamic phenomena in the underground mine of the Oktyabrsky copper-nickel ore deposit. The purpose of this work is to substantiate the methodology for measuring EMR parameters in underground conditions and to determine their criteria for local prediction of impact hazard in the mining and geological conditions of the Skalisty mine. To achieve this goal, EMR measurements were performed at the experimental and methodological work site using the ANGEL-M equipment complex. The verification of the EMR method results is based on deformation monitoring data, which allowed the results of laboratory tests and field trials to be confirmed to justify the effectiveness of the method in solving the problem of local prediction of rockburst hazard. The work presents the results of measurements of EMR parameters on the experimental and methodological site in 2023 and 2026, and shows their relationship with the processes occurring in the near-boundary part of the array.

**Keywords:** Oktyabrskoye field, Skalisty mine, underground mining, natural electromagnetic radiation, deformation monitoring, hazardous geodynamic phenomena, local forecast

**For citation:** Daniliev S.M., Shnyukova O.M., Danilieva N.A. Justification of the technology of local impact hazard prediction using natural electromagnetic radiation in the underground conditions of the Skalisty mine in the Norilsk ore district. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 74–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-74-79>.

### Введение

**Н**орильский рудный район, к которому относятся Октябрьское и Талнахское месторождения, является одним из самых больших по запасам медно-никелевых руд, что делает данные месторождения уникальными [1–3]. На текущий момент из-за того, что добыча на рудниках Норильска снижается [4], необходимо вводить в эксплуатацию новые объекты. Новый рудник должен соответствовать новейшим требованиям безопасности, применяемым к подземным горным выработкам. В связи с этим необходимы разработка и развитие мероприятий, направленных на выявление опасных геодинамических явлений [5, 6], к которым относят горные удары, микроудары, толчки и стреляния [7–9].

Прогноз удароопасности делится на локальный и региональный [10–12].

Региональный прогноз удароопасности выполняется в пределах шахтного поля при помощи сейсмических станций службы прогноза и предотвращения горных ударов, функционирующей на предприятии [13]. Такой прогноз позволяет произвести выделение опасных зон в пределах целого месторождения. При расширении горных работ, которое заключается в вовлечении в разработку новых горизонтов, появляется необходимость в обеспечении безопасности на рудниках, где временно отсутствует сеть сейсмических павильонов, поэтому стоит вопрос об обеспечении безопасности при помощи локальных методов, преимуществом которых является их оперативность.

Локальный прогноз удароопасности осуществляется на определенном участке горной выработки. Одним из условий применения данного прогноза является его периодичность. Так, например, необходимо повторять измерения на тех участках, где была установлена категория «Опасно». Проведение мероприятий по прогнозированию проявлений горного давления дает возможность своевременно принять меры для приведения горных выработок в неудароопасное состояние. Локальный прогноз может производиться на основе применения геофизических методов, таких как акустические и электромагнитные [14–16].

Несмотря на то что геофизика давно занимает важное место в разведке полезных ископаемых, внедрение методов для контроля за состоянием массива продолжает развиваться. Стремление к повышенной безопасности и снижению эксплуатационных затрат стимулирует использование геофизических подходов в шахтах, все чаще заменяя или дополняя традиционные методы [17–19]. В условиях Норильского рудного района перспективным видится использование метода контроля за состоянием горного массива на основе исследования естественных электромагнитных полей [20].

Исследования явления естественного электромагнитного излучения производились как в России, так и за рубежом. Во время многочисленных лабораторных испытаний обнаружено, что излучение электромагнитного сигнала происходит при разрушении различных горных пород и минералов. Явление естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) наблюдается при разрушении: гранита [21], угля [22], кварца [23], габбро-долеритов [24] и др.

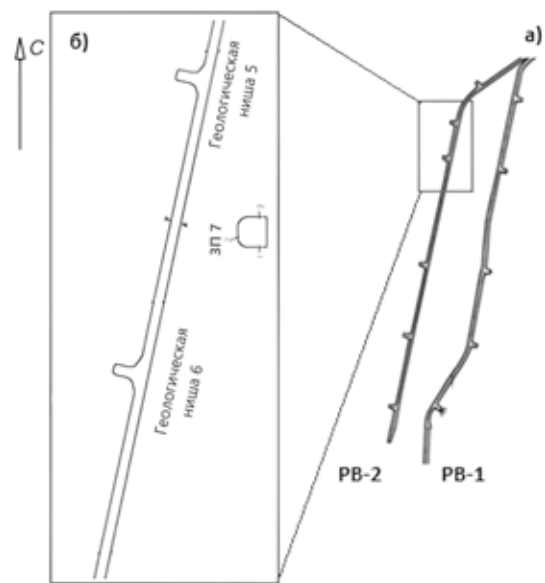
Помимо лабораторных испытаний, явление электромагнитной эмиссии наблюдается и на другом масштабном уровне, сопоставимом с размером горных выработок [25], из чего следует, что данное явление может лежать в основе методов неразрушающего контроля за состоянием горного массива.

**Цель исследований:** обоснование технологии локального прогноза удароопасности методом естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в подземных условиях рудника Скалистого Норильского рудного района.

**Объектом исследования** является рудник Скалистый шахты «Глубокая» Октябрьского месторождения [26].

В шахте «Глубокая» на данный момент пройдено две разведочные горные выработки РВ-1 и РВ-2 (рис. 1а).

Фрагмент участка опытно-методических работ приведен на рисунке 1б.



**Рис. 1.** Общая схема разведочных горных выработок (а) и фрагмент участка опытно-методических работ (б)

**Fig. 1.** General scheme of exploration mining operations (a) and fragment of an experimental methodological work site (b)

### Методика исследований

Для оценки устойчивости горного массива и определения деформаций [27–29] приконтурной части на базе центра геодинамической безопасности ГМК «Норильский никель» реализован деформационный мониторинг горных выработок РВ-1 и РВ-2.

В выработках оборудованы замерные пункты (ЗП) с установленными реперами, конфигурация которых показана на рисунке 2.

На оборудованных замерных пунктах выполнены начальные измерения, которые послужили основой для определения деформации приконтурной части выработки при мониторинговых измерениях с определенной периодичностью. Для развития геофизических технологий контроля за состоянием массива выбран участок опытно-методических работ в выработке РВ-2, находящийся между геологическими ни-

шами 5 и 6, пересекающий наблюдениями замерный пункт ЗП17 (рис. 1а).

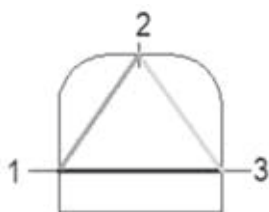


Рис. 2. Схема замерного пункта: 1, 2, 3 – реперы  
Fig. 2. The scheme of the measuring point: 1, 2, 3 – bench marks

На данном замерном пункте реализовано 9 циклов наблюдений в период с 24 марта 2022 года по 14 декабря 2023 года, по которым определены смещения пород в контуре горных выработок (рис. 3). На рисунке 3 можно увидеть максимальное смещение контура выработки на дату измерений 15 марта 2023 года, которое составляет -6 мм при среднем значении 3 мм. Анализ результатов деформационного мониторинга позволяет сделать вывод о развитии зоны напряжений разнонаправленного характера в горном массиве.

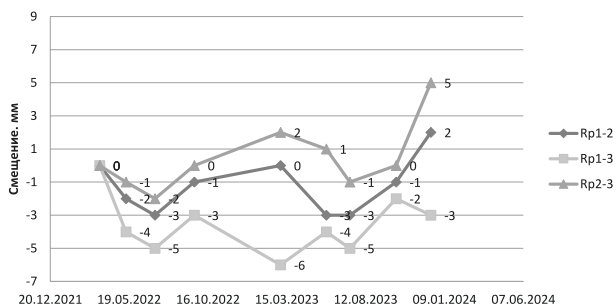


Рис. 3. Изменение смещений контура выработки /  
Fig. 3. Changing the displacement of the production contour

На рисунке 4 приведены результаты расчета скорости деформации.

По рассчитанным скоростям деформации в интервале горной выработки (рис. 4) отмечается рост скорости деформаций в период 15 марта – 9 октября 2023 года.

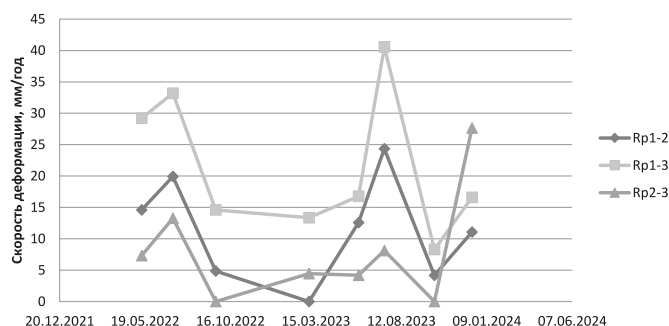


Рис. 4. Скорость деформации участка горной выработки РВ-2 /  
Fig. 4. Rate of deformation of the mining section RV-2

#### Геофизические исследования

Помимо деформационного мониторинга в марте 2023 года, когда было отмечено значительное увеличение смещения контура горной выработки на выбранном участке опытно-методических работ, проведены измерения методом естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) при

помощи аппаратного комплекса «АНГЕЛ-М» (производства АО «ВНИМИ») [30–32].

На данном участке определение параметров электромагнитного излучения выполнено по разработанной методике измерений ЕЭМИ, базирующейся на зарегистрированных уровнях электромагнитных сигналов от горных пород, вмещающих выработку РВ-2. Методика предусматривала проведение измерений ЕЭМИ по профилю вдоль горной выработки РВ-2 от геологической ниши 5 до геологической ниши 6 с шагом между измерениями, не превышающим радиус ближней зоны электромагнитного сигнала (10 м), с регистрацией вертикальной (Z) двух горизонтальных (X, Y) компонент естественного электромагнитного поля.

Для этого регистрация проводилась при трех положениях антенной системы прибора «АНГЕЛ-М» относительно пространства выработки, а именно компонента X, ориентирована по оси выработки, компонента Y, ориентирована в борт выработки, и Z, ориентирована в кровлю. Аппаратурный комплекс «АНГЕЛ-М» обладает высокой чувствительностью к изменениям электромагнитного поля с частотой дискретизации, равной 467 кГц, что позволяет за 1 с измерений получать 467 тыс. отсчетов. При таких параметрах регистрации в единичном акте измерений продолжительностью 10 с уже статистически будут достоверно проявляться параметры естественного электромагнитного излучения. За один акт измерений в качестве основных параметров определяется средний уровень амплитуды электромагнитного поля (параметр А) и соотношение интенсивности импульсных высокоамплитудных электромагнитных сигналов к общему фону (параметр В).

На рисунке 5 представлены результаты измерения параметров естественного электромагнитного излучения за март 2023 года на участке опытно-методических работ разведочной выработки РВ-2.

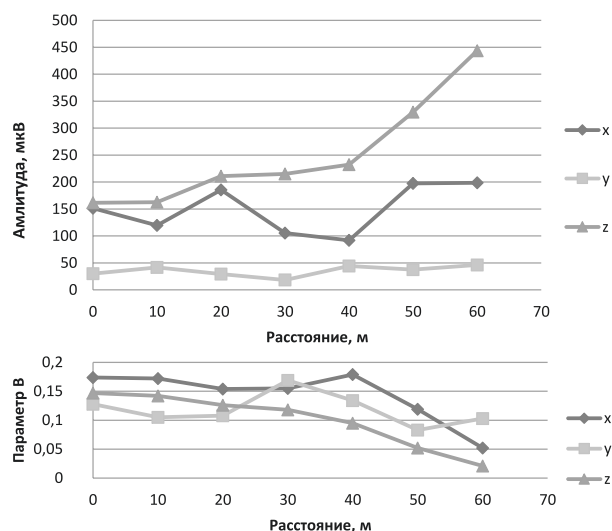


Рис. 5. Результаты измерения параметров естественного электромагнитного излучения в 2023 году /  
Fig. 5. Results of measuring the parameters of natural electromagnetic radiation in 2023

#### Результаты и их обсуждение

По результатам измерений 2023 года отмечаются повышенные значения амплитуды естественного электромагнитного поля, особенно при приближении к геологической нише 6. Одновременно с ростом амплитуды ЕЭМИ наблюда-

ется увеличение соотношения импульсных высокоамплитудных сигналов, что приводит к снижению параметра В.

Согласно лабораторным испытаниям горных пород вмещающих выработки РВ-1, 2, параметры амплитуды импульсного естественного электромагнитного поля возрастают с ростом напряжений [33]. На участке опытно-методических работ в районе геологической ниши 6 происходит рост средних значений амплитуд электромагнитного сигнала более чем в два раза при ориентации антенны в кровлю выработки (Z-компонента), что позволяет сделать предположение о преимущественно вертикальной ориентации сильных напряжений в массиве.

По параметру В, характеризующему интенсивность событий, имеющих высокую амплитуду, можно отметить его понижение к геологической нише 6 для всех компонент (X, Y и Z), что позволяет судить о развитии в выработке процессов интенсивного трещинообразования [34]. Данные выводы подтверждаются результатами деформационного мониторинга, на которых отмечается после марта 2023 года рост скорости деформаций горных выработок (рис. 4).

Исходя из результатов измерений методом ЕЭМИ (рост параметра А и понижение параметра В), а также последующего во времени увеличения скорости деформаций, можно сделать заключение, что в период измерений горная выработка находилась в состоянии «Опасно».

После проходки выработок РВ-1 и РВ-2 и проведения всех необходимых мероприятий по результатам прямых измерений выработки находятся в состоянии «Неопасно». Для подтверждения ранее сделанных выводов и категории «Неопасно» по параметрам естественного электромагнитного поля по участку опытно-методических работ разведочной выработки РВ-2 в январе 2026 года выполнены повторные измерения, результаты которых представлены на рисунке 6.

По результатам повторных измерений ЕЭМИ отмечается, что по всем компонентам (X, Y, Z) изменение амплитуд естественного электромагнитного поля вдоль всего участка опытно-методических работ не превышает 20 %, а параметр В ведет себя стабильно без резкого изменения и имеет достаточно высокое значение, что говорит о малой интенсивности высокоамплитудных импульсов. Следовательно, полученные результаты повторных наблюдений параметров ЕЭМИ полностью подтверждают информацию о стабильности выработки РВ-2 «Неопасно».

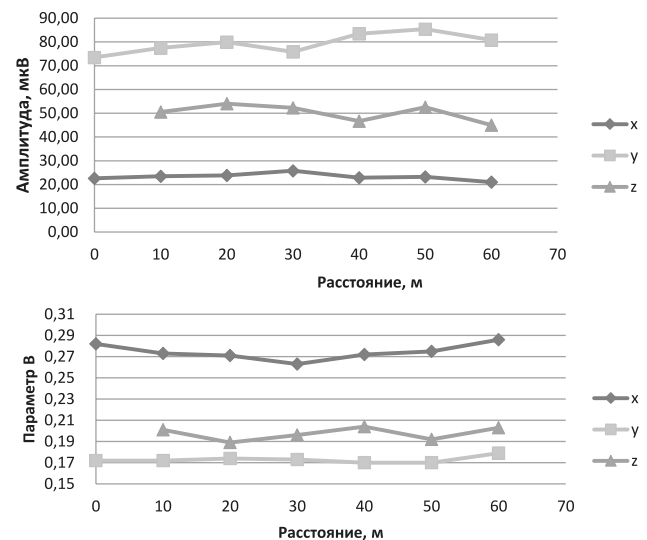


Рис. 6. Результаты измерения параметров естественного электромагнитного излучения в 2026 году /

Fig. 6. Results of measuring natural electromagnetic radiation parameters in 2026

### Выводы

1. Выполненные исследования методом естественного электромагнитного излучения на участке опытно-методических работ и результаты независимого деформационного мониторинга позволяют обосновать эффективность метода ЕЭМИ для локализации интервалов повышенных напряжений, развития процессов интенсивного трещинообразования в горно-геологических условиях шахты «Глубокая» Октябрьского месторождения.

2. В ходе исследований была установлена взаимосвязь между основными параметрами ЕЭМИ и процессами трещинообразования в приконтурной части массива. Увеличение амплитуды А и уменьшение параметра В относительно фоновых значений говорит о развитии в горной выработке опасных геодинамических процессов.

3. Полученные результаты позволяют успешно верифицировать предложенные методические приемы для изучения параметров естественного электромагнитного поля и рекомендовать применение данной технологии в комплексе со стандартными методами для решения задач по контролю за состоянием массива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Krivolutsкая N.A., Gongalsky B.I., Kedrovskaya, et al. Geology of the western flanks of the Oktyabr'skoe deposit, Norilsk district, Russia: Evidence of a closed magmatic system. *Mineralium Deposita*. 2019; 54 (4): 611-630. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0827-z>.
2. Krivolutsкая N.A., Tolstykh N., Kedrovskaya T.B., et al. World-Class PGE-Cu-Ni Talnakh Deposit: New Data on the Structure and Unique Mineralization of the South-Western Branch. *Minerals*. 2018; 8 (4): 124. <https://doi.org/10.3390/min8040124>.
3. Дурягина А.М., Таловина И.В., Либервирт Х. и др. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья. *Записки Горного института*. 2022; 256: 527-538. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.76>.  
Duryagina A.M., Talovina I.V., Lieberwirth H., et al. Morphometric parameters of sulphide ores as a basis for selective ore dressing. *Journal of Mining Institute*. 2022; 256: 527-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.76>.
4. Хайрутдинов М.М., Ковальский А.Б. Технология и порядок разработки удароопасных участков рудника «Скалистый» с применением системы с закладкой выработанного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008; 7: 304-309.  
Khajrutdinov M.M., Kovalsky A.B. Technology and procedure for developing high-risk areas of the Skalisty mine using the system of filling the worked-out space. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2008; 7: 304-309. (In Russ.).
5. Sidorenko A.A., Sidorenko S.A. A Comprehensive Strategy for Safe and Efficient Mining of Thick, Spontaneous Combustion-prone Coal Seams under Geodynamic Hazard Conditions. *International Journal of Engineering Transactions B Applications*. 2026; 39 (4): 818-827. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.01>.
6. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Зеликман Д.И. и др. Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмофотографического прозвучивания. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; 25 (1). <https://doi.org/10.2205/2025es000993>.

- Glazunov V.V., Efimova N.N., Zelikman D.I., et al. Zones Localization of Hazardous Geological Processes Habit of the Coastal Cliff According to 3D Seismotomography Sounding Data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; 25 (1). (In Russ.). <https://doi.org/10.2205/2025es000993>.
7. Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения. *Записки Горного института*. 2022; 256: 539-548. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>.  
Gospodarikov A.P., Trofimov A.V., Kirkin A.P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uni-axial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022; 256: 539-548. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>.
  8. Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С. и др. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных. *Записки Горного института*. 2025; 276 (1): 142-156.  
Kazantseva V.V., Ozhigin D.S., Kosarev N.S., et al. Development of complex system of geotechnical monitoring of technogenic objects based on geospatial data. *Journal of Mining Institute*. 2025; 276 (1): 142-156. (In Russ.).
  9. Manchao He, Tai Cheng, Yafei Qiao, et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023; 15 (5): 1312-1353. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014>.
  10. 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>.
  11. Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Грунин А.П. и др. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023; (5): 177-184. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230519>.  
Rasskazov I.Yu., Anikin P.A., Grunin A.P., et al. Improvement of Local Rockburst Control Equipment in Mineral Mining. *Journal of Mining Science*. 2023; 59 (5): 862-869. <https://doi.org/10.1134/s1062739123050198>.
  12. Разумов Е.Е., Простов С.М., Шабанов Е.А. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024; 335 (8): 174-186. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4420>.  
Razumov E.E., Prostov S.M., Shabanov E.A. Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2024; 335 (8): 174-186. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4420>.
  13. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С. и др. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений хибинского массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; (7): 5-17. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_7\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5).  
Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., et al. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny Massif. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; (7): 5-17. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_7\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5).
  14. He L., Li Q., An B. A Study of the Characteristics of Micro-Seismic (ME) and Electromagnetic Radiation (EMR) Signals under the Static Load Conditions of Rocks. *Applied sciences*. 2023; 13: 12910. <https://doi.org/10.3390/app132312910>.
  15. Potokin A.S., Pak A.K. Methods for determining rockburst in mining workings. *Mining Industry Journal*. 2022; (5): 139-143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-139-143>.
  16. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Клишко Т.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле. *Физическая мезомеханика*. 2004; 7 (S2): 285-287. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.  
Bespal'ko A.A., Yavorovich L.V., Klimko T.A. A study of electromagnetic emission of rock contacts in mine massif. *Physical Mesomechanics*. 2004; 7 (S2): 285-287. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.
  17. Жерлыгина Е.С., Куранова М.Е., Гусев В.Н. и др. Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород. *Горная промышленность*. 2025; (1): 162-169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>.  
Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., et al. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. *Russian Mining Industry*. 2025; (1): 162-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>.
  18. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А. и др. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (9-1): 5-21. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5).  
Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Evsiukova A.A., et al. Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; (9-1): 5-21. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5).
  19. Козырев А.А., Константинов К.Н., Лобанов Е.А. и др. Оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности глубоких выработок рудника «Скалистый» комплексом натурных методов. *Горная промышленность*. 2023; (5): 108-113. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>.  
Kozyrev A.A., Konstantinov K.N., Lobanov E.A., et al. Assessment of the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of deep mining workings of the Skalisty mine by in-situ methods. *Russian Mining Industry*. 2023; (5): 108-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>.
  20. Данильев С.М., Шнюкова О.М. Перспективы развития технологии регистрации естественного электромагнитного излучения для прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильска. *Науки о Земле и недропользование*. 2024; 47 (1): 56-65. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>.  
Daniliev S.M., Shnyukova O.M. Development prospects of natural electromagnetic radiation recording technology to predict geodynamic phenomena in Norilsk mines. *Earth sciences and subsoil use*. 2024; 47 (1): 56-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>.
  21. Yoshida S., Ogawa T. Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2004; 109: 09204. <https://doi.org/10.1029/2004JB003092>.
  22. Liyang Gao, Wenrui Zhang, Wei Lu, et al. Study on the effects of temperature and immersion on the acoustic emission and electromagnetic radiation signals of coal rock damage under load. *Engineering Geology*. 2022; 297 (2): 106503. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106503>.
  23. Martinelli G., Plescia P., Tempesta E. Electromagnetic emissions from quartz subjected to shear stress: Spectral signatures and geophysical implications. *Geosciences*. 2020; 10 (4): 140. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040140>.
  24. Данильев С.М., Мулев О.М., Шнюкова О.М. Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения. *Горный журнал*. 2024; (9): 51-55. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.08>.

- Daniliev S.M., Mulev S.N., Shnyukova O.M. Correlation and regression analysis of natural electromagnetic and acoustic emission activity in rock samples of the Oktyabrsky deposit. *Mining Journal*. 2024; (9): 51–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.08>.
25. Frid V., Vozoff K. Electromagnetic Radiation Induced by Mining Rock Failure. *International Journal of Coal Geology*. 2005; 64 (1-2): 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.03.005>.
26. Трофимов А.В., Киркин А.П., Кормнов А.А. и др. Исследование напряженно-деформированного состояния массива Октябрьского и Талнахского месторождений методом полной разгрузки керн. *Цветные металлы* 2024; (10): 31-39. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.10.05>.  
Trofimov A.V., Kirkin A.P., Kormnov A.A., et al. Study of the stress-strain state of oktyabrskoe and talnakhskoe deposits' rock mass by overcoring method. *Non-ferrous Metals*. 2024; (10): 31-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.10.05>.
27. Лобанова Т.В., Квочин В.А., Клишко В.К. Деформационный мониторинг процессов накопления напряжений для контроля удароопасности массива при отработке Таштагольского месторождения. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2005; 2: 148-153.  
Lobanova T.V., Kvochin V.A., Klimko V.K. Deformation monitoring of stress accumulation processes to control the impact hazard of the massif during the development of the Tashtagol deposit. *Interexpo GEO-Siberia*. 2005; 2: 148-153. (In Russ.).
28. Лобанова Т.В., Трофимова О.Л. Современные геодинамические движения в районе ствола «Сибиряк» Таштагольского рудника. *Проблемы недропользования*. 2018; (3): 70-80. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.03.070>.  
Lobanova T.V., Trofimova O.L. Up-to-date geodynamic movements in the area of the mine shaft «sibiryak» of the Eashtagol mine. *Problems of Subsoil Use*. 2018; (3): 70-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.03.070>.
29. Burda J., Mrlina J., Vilimek V. Geodynamic phenomena in hazardous fault zones affected by extensive surface mining in Central Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022; 81: 153. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02650-x>.
30. Das S., Mallik J., Dhankhar S., et al. Application of Fracture Induced Electromagnetic Radiation (FEMR) technique to detect landslide-prone slip planes. *Natural Hazard*. 2020; 101: 505-535. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03883-3>.
31. Шадрин А.В., Плаксин М.С., Застрелов Д.Н. и др. Методика анализа достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами. *Горная промышленность*. 2023; (S2): 11-17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-11-17>.  
Shadrin A.V., Plaksin M.S., Zastrellov D.N., et al. Methodology for analyzing the reliability of geophysical methods that use portable instruments for predicting dynamic phenomena. *Russian Mining Industry*. 2023; (S2): 11-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-11-17>.
32. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D., et al. Fracture Electromagnetic Radiation Induced by a Seismic Active Zone (in the Vicinity of Eilat City, Southern Israel). *Remote Sensing*. 2023; 15 (14): 3639. <https://doi.org/10.3390/rs15143639>.
33. Xin Li, Jing Zhou, Zhen Yang, et al. Time-frequency evolution of electromagnetic radiation in deformation and fracture of composite coal-rock under different loading rates. *Construction and Building Materials*. 2024; 453: 139030, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139030>.
34. Jinhui Han, Songling Huang, Wei Zhao, et al. Study on electromagnetic radiation in crack propagation produced by fracture of rocks. *Measurement*. 2018; 131 (4): 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.067>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сергей Михайлович Данильев** –  
доцент, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры  
геофизики, Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

**Ольга Михайловна Шнюкова** –  
аспирант кафедры геофизики, Санкт-Петербургский  
горный университет императрицы Екатерины II,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Наталья Андреевна Данильева** –  
доцент, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры  
геофизики, Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

### Критерии авторства:

С. М. Данильев – формулировка идеи и цели исследования, разработка концепции статьи, редактирование текста;  
О. М. Шнюкова – подготовка и редактирование текста, описание методов исследования, написание введения и выводов; Н. А. Данильева – редактирование текста, обсуждение результатов, подготовка графических материалов.

### Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.05.2026  
Поступила после рецензирования: 31.05.26  
Принята к публикации: 11.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

**Sergey M. Daniliev** –  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associated Professor,  
Associated Professor of the Geophysics Department, Empress  
Catherine II Saint Petersburg Mining University,  
St. Petersburg, Russian Federation

**Olga M. Shnyukova** –  
Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg  
Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

**Natalia A. Danilieva** –  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associated Professor,  
Associated Professor of the Geophysics Department, Empress  
Catherine II Saint Petersburg Mining University,  
St. Petersburg, Russian Federation

### Contribution:

S. M. Daniliev – formulation of the idea and purpose of the study, development of the article's concept, editing of the text;  
O. M. Shnyukova – writing and editing the text, describing the research methods, writing the introduction and conclusions;  
N.A. Danilieva – editing the text, discussing the results, and preparing graphic materials.

### Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

### Article info

Received: 06.05.2026  
Revised: 31.05.26  
Accepted: 11.06.2026

# Методология цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива горных пород

С. С. Кубрин<sup>1</sup>, И. Е. Шиповский<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

✉ [iv\\_ev@mail.ru](mailto:iv_ev@mail.ru)

**Резюме.** Предложена методология цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива горных пород, ориентированная на описание не только достижения предельного состояния, но и последующей пространственно-временной кинетики локализации, фрагментации и переноса разрушенной массы. Методологический каркас включает внутреннюю переменную стадии переходного разрушения  $F$ , обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение  $\Psi$ , критическое значение параметра воздействия  $\Psi_c$ , нормированный параметр воздействия  $\Psi/\Psi_c$ , закон роста активной зоны и механизмы истощения энергетического или структурного ресурса. Показано, что физическое содержание параметра воздействия задается раздельно для газомеханических, гравитационно-сдвиговых и взрывных процессов, тогда как общей остается структура «параметр воздействия – критическое значение – рост – истощение». Для численной реализации рассмотрен модифицированный метод сглаженных частиц, позволяющий сопровождать большие деформации, образование свободных поверхностей и фрагментацию без априорного задания геометрии разрушения. Сформулирована связь переменной  $F$  с деградацией жесткости, прочности и проницаемости; показана необходимость контроля условия Куранта, длины сглаживания, искусственной вязкости, контактных параметров и энергетического баланса. Отдельно рассмотрено сопряжение геомеханической модели с газовым балансом выемочного участка и сквозным расчетом взрывного воздействия. Методология предназначена для сценарной оценки выбросоопасности, устойчивости массива и последствий динамического воздействия при разработке твердых полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** геомеханика, массив горных пород, переходное разрушение, цифровое моделирование, внутренняя переменная, активная зона, метод сглаженных частиц, газоразделение, метаноперенос, взрывное воздействие

**Для цитирования:** Кубрин С.С., Шиповский И.Е. Методология цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива горных пород. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 80-85. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-80-85>.

## Methodology for digital modeling of transient rock mass failure processes

S. S. Kubrin<sup>1</sup>, I. E. Shipovskii<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation

✉ [iv\\_ev@mail.ru](mailto:iv_ev@mail.ru)

**Abstract.** A methodology for digital modeling of transient rock mass failure processes is proposed. It is intended to describe not only attainment of a limit state, but also the subsequent spatiotemporal kinetics of localization, fragmentation, and transport of failed material. The methodological framework includes the internal variable  $F$  characterizing the stage of transient failure, the generalized parameter  $\Psi$  of the failure-inducing action, the critical action parameter  $\Psi_c$ , the normalized action parameter  $\Psi/\Psi_c$ , an active-zone growth law, and mechanisms accounting for depletion of the available energy or structural resource. The physical meaning of the action parameter is specified separately for gas-mechanical, gravity-shear, and blasting processes, whereas the common structure remains “action parameter - critical value - growth - depletion”. A modified smoothed particle hydrodynamics method is considered for numerical implementation. It enables large deformations, free-surface formation, and fragmentation to be traced without prescribing the failure geometry a priori. The relation of  $F$  to degradation of stiffness, strength, and permeability is formulated. The need to control the Courant condition, smoothing length, artificial viscosity, contact parameters, and energy balance is demonstrated. Coupling of the

geomechanical model with the gas balance of a mining panel and with a through calculation of blasting is considered separately. The methodology is intended for scenario-based assessment of coal-and-gas outburst hazard, rock mass stability, and consequences of dynamic action in solid mineral extraction.

**Keywords:** geomechanics, rock mass, transient failure, digital modeling, internal variable, active zone, smoothed particle hydrodynamics, gas release, methane transport, blasting action

**For citation:** Kubrin S.S., Shipovskii I.E. Methodology for digital modeling of transient rock mass failure processes. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 80-85. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-80-85>.

### Введение

Современная инженерия массивов горных пород развивается в направлении совместного применения многофизического эксперимента, численного моделирования и цифровой обработки данных. Для глубоких и структурно неоднородных массивов традиционные эмпирические и квазистатические схемы все чаще дополняются моделями, учитывающими динамическое нагружение, трещиноватость, слоистость, водо- и газонасыщенность, а также эволюцию микроповреждений до формирования макроскопической зоны разрушения [1–6]. В задачах горного производства это относится к локальным обрушениям, потере устойчивости бортов и откосов, разрушению приконтурных зон выработок, внезапным выбросам угля и газа и технологическому взрывному воздействию [7].

Особую сложность представляют быстропротекающие процессы, для которых достижение критерия прочности является только начальной стадией события. После локальной активации происходит перераспределение напряжений, деградация свойств, образование новых свободных поверхностей, изменение фильтрационно-емкостных характеристик и перенос разрушенного материала. Для газоносных угольных пластов многофакторная природа выброса, включающая напряженное состояние, прочность угля, газовое давление, десорбцию, фильтрацию и пространственную неоднородность, подтверждена классическими и современными исследованиями [8–14]. Поэтому расчетная модель, фиксирующая только факт превышения предельного состояния, не дает достаточного основания для оценки сценария последующего развития опасного процесса.

**Цель работы:** обосновать методологию цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива, объединяющую энергетико-кинетическую постановку, вычислительное описание больших деформаций и фрагментации, а также сопряжение механического состояния с газовым и взрывным воздействием. Научная новизна состоит в переносе центра анализа с момента достижения критерия на расчетную эволюцию активной зоны, определяемую обобщенным параметром воздействия, вызывающего разрушение, его критическим значением, обратными связями и доступным энергетическим ресурсом.

### Методический дефицит существующих расчетных схем

В инженерной геомеханике применяются критерии прочности, поверхности текучести, коэффициенты устойчивости и показатели запаса. Они необходимы для оценки допустимости напряженно-деформированного состояния, но сами по себе не описывают посткритическую кинетику. При динамическом и сдвиговом нагружении макроскопическое разрушение формируется в результате зарождения, роста и коалесценции локальных дефектов; его траектория зависит от структуры массива, формы выработки, ориентации трещин и режима нагружения [2–6]. Следовательно, расчет должен от-

вечать не только на вопрос о достижении предела прочности, но и на вопросы о месте зарождения активной зоны, скорости ее роста, возможности затухания и переходе к связанной макроскопической области локализованного разрушения.

В газоносном угольном пласте механическое раскрытие дефектов изменяет пористость и проницаемость, перераспределение давления газа изменяет эффективные напряжения, а переход метана в свободное состояние формирует дополнительный энергетический вклад. Модели, основанные на газовом потоке, механике разрушения, энергетическом балансе и связанном деформировании, раскрывают отдельные стороны этого процесса [9–14], но остается необходимость в единой вычислительной структуре, сопровождающей переход от локальной активации до фрагментации и массопереноса.

В предлагаемой методологии базовая последовательность записывается как «параметр воздействия – критическое значение – рост – исчерпание». Обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение, характеризует совокупную интенсивность механического, энергетического, газомеханического или технологического воздействия на локальный объем массива; его критическое значение включает кинетику переходного процесса; закон роста задает скорость вовлечения материала в активную зону; механизм исчерпания ограничивает процесс при снижении доступной энергии, разгрузке газовой фазы или потере структурного ресурса среды. Такой подход является геомеханическим каркасом кинетики, первоначально выработанной и экспериментально проверенной для инициирования детонации во взрывчатых веществах при внешнем воздействии [15].

### Физическая постановка методологии

Массив рассматривается как техногенно-нагружаемая неоднородная геосреда с исходным напряженным состоянием, структурной нарушенностью и при необходимости поровой или трещинной газовой фазой. Стадия переходного процесса описывается внутренней переменной  $F$ , для которой  $0 \leq F \leq 1$ :  $F = 0$  соответствует докритическому состоянию локального объема, а  $F \rightarrow 1$  – развитой активации локализованного разрушения. Переменная  $F$  не тождественна классической переменной поврежденности  $D$ . Величина  $D$  характеризует деградацию материала, тогда как  $F$  отражает степень вовлечения локального объема в развивающийся переходный процесс; при конкретной реализации  $D$  может входить в закон эволюции  $F$  или определять деградационные зависимости.

Обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение  $\Psi$ , не должен трактоваться как единая размерная физическая величина для всех классов задач. Для сдвигового разрушения он формируется с учетом интенсивности девиаторных напряжений, сопротивления сдвигу и гравитационного потенциала; для газоносного пласта – эффективных напряжений, давления газа, проницаемости и энергетического вклада газовой фазы; для взрывного воздействия – импуль-

сного давления, сдвигового нагружения и плотности локально переданной энергии. Критическое значение параметра воздействия  $\Psi_c$  разграничивает докритический и активный режимы, а отношение  $\Psi/\Psi_c$  используется как нормированный параметр воздействия. Универсальной является не физика источника, а пороговая структура цифрового описания.

В безразмерной форме один из феноменологических вариантов закона эволюции  $F$  имеет вид:

$$\frac{dF}{dt} = A(\Psi - \Psi_c)^{m(1-F)^n} + G F^{q(1-F)^r} - D_F F, \quad (1)$$

$$0 \leq F \leq 1$$

где  $\langle \cdot \rangle$  – оператор положительной части;  $\Psi_c$  – критическое значение параметра воздействия;  $A$  и  $G$  – параметры инициирования и самоускоряющегося роста;  $m$ ,  $n$ ,  $q$ ,  $r$  – показатели нелинейности;  $D_F$  – коэффициент затухания. Первое слагаемое описывает включение кинетики при превышении критического значения параметра воздействия, второе – развитие уже активированной области, третье – затухание или истощение ресурса. Вид закона и его параметры подлежат идентификации для каждого физического класса задач.

Связь  $F$  с механическими и фильтрационными свойствами может быть задана деградационными функциями:

$$E(F) = E_0(1 - \lambda_E F), \quad c(F) = c_0(1 - \lambda_c F), \quad (2)$$

$$\tan \varphi(F) = \tan \varphi_0(1 - \lambda_\varphi F)$$

где  $E_0$ ,  $c_0$  и  $\varphi_0$  – исходные значения модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения;  $\lambda_E$ ,  $\lambda_c$  и  $\lambda_\varphi$  – коэффициенты деградации. Активная зона определяется как совокупность локальных объемов, для которых  $F \geq F_{cr}$ . Термин «пространственно-связная зона» используется в геометрическом смысле: первоначально разобщенные активированные участки образуют непрерывный кластер или поверхность, по которой возможны разгрузка, сдвиг либо перенос разрушенного материала.

#### Математическая и численная реализация

Континуальная основа цифровой модели задается законами сохранения массы, количества движения и энергии в лагранжевой форме. Напряжения представляются суммой шаровой и девиаторной частей; давление определяется уравнением состояния, а девиаторная реакция – выбранной упруго-пластической или повреждаемой моделью геосреды. Для газоносного угля дополнительно вводятся эффективные

напряжения и баланс газовой массы; при сквозном расчете взрыва используются уравнения состояния взрывчатого вещества и продуктов детонации.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} v, \quad \rho \frac{dv}{dt} = \operatorname{div} \sigma + \rho b,$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma : \varepsilon, \quad \sigma = -pI + s,$$

где  $\rho$  – плотность;  $v$  – скорость;  $\sigma$  – тензор напряжений;  $b$  – массовые силы;  $e$  – удельная внутренняя энергия;  $\varepsilon$  – тензор скоростей деформаций;  $p$  – давление;  $s$  – девиатор напряжений.

Для задач с большими деформациями, раскрытием трещин, образованием свободных поверхностей и фрагментацией целесообразна лагранжева бессеточная реализация. Метод сглаженных частиц описывает текущую конфигурацию материальными частицами, взаимодействующими через ядро сглаживания, и не требует перестроения конечно-элементной сетки при изменении топологии среды [16]. Для областей умеренных деформаций и задания граничных условий может применяться гибридная SPH/FEM-схема; применение SPH к разрушению и обрушению горных пород показано, в частности, в работе [17].

Дискретная аппроксимация поля  $A$  в точке  $x_i$  имеет вид

$$\langle A(x_i) \rangle = \sum_j \left( \frac{m_j}{\rho_j} \right) A_j W(x_i - x_j, h) \quad (4)$$

где  $m_j$  и  $\rho_j$  – масса и плотность соседней частицы  $j$ ;  $W$  – ядро сглаживания;  $h$  – длина сглаживания. В модифицированной постановке каждая частица дополнительно несет внутреннюю переменную  $F$ , локальный параметр воздействия  $\Psi$  и параметры деградирующей модели материала.

Для явной схемы критический временной шаг выбирается из условия Куранта:

$$\Delta t \leq C_{CFL} \frac{h}{c_{eff}} \quad (5)$$

где  $C_{CFL}$  – коэффициент устойчивости;  $c_{eff}$  – эффективная скорость распространения возмущений. Достоверность результата требует анализа чувствительности к размеру частиц,  $h$ , числу соседей, искусственной вязкости, контактными параметрам и шагу времени. Положение и размер активной зоны должны быть устойчивы к разумному изменению дискретизации, а энергетический баланс – согласован с выполненной внешней работой и внутренней диссипацией.



Рис. 1. Логика цифрового описания переходного процесса разрушения массива горных пород /  
Fig. 1. Logic of digital description of a transient rock mass failure process

### Сопряжение с цифровым управлением газовыделением

При высокоинтенсивной отработке угольных пластов газовый фактор является частью сопряженной геомеханико-аэрогазодинамической системы. Выработанные пространства, зона обрушения, дезинтегрированные породы, закрепное пространство, очистной забой и дегазационные каналы образуют связанную область метанопереноса, параметры которой зависят от степени разрушенности и проницаемости массива. Исходные данные включают аэродинамические сопротивления выработок [18], проницаемость обрушенных и уплотненных пород [19], дебиты метана, параметры дегазации и технологическую нагрузку на очистной забой.

Минимальная связь внутренней переменной с фильтрационно-емкостными свойствами может быть записана в виде

$$k(F) = k_0 \exp(\chi_F), \quad n(F) = n_0(1 + \chi_n F), \quad (6)$$

$$\sigma' = \sigma - b p_g I$$

где  $k$  – проницаемость;  $n$  – пористость или эффективная емкость трещинно-порового пространства;  $p_g$  – давление газа;  $b$  – коэффициент Био.

Рост  $F$  увеличивает нарушенность и проницаемость, а газовое давление изменяет эффективные напряжения в скелете угля. При этом корректно говорить о пространственно-временном перераспределении эффективных напряжений: в приконтурной зоне возможно снижение бокового обжатия и рост сдвиговых или растягивающих компонент, тогда как в соседних участках возникает дополнительная концентрация напряжений.

Баланс газовой массы в повреждаемом порово-трещинном объеме представляется соотношением

$$\frac{\partial(n(F)p_g)}{\partial t} + \text{div}(p_g v_g) = Q_{\text{des}}(F, p_g) - Q_{\text{out}}(F, k, p_g). \quad (7)$$

На ранней стадии доминирует источник  $Q_{\text{des}}$ , связанный с десорбцией и переходом метана в свободное состояние. После формирования пространственно-связной трещиноватой сети возрастает расходный член  $Q_{\text{out}}$ , определяющий филь-

трационную разгрузку в сторону выработки или выработанного пространства. Смена доминирующего режима газового баланса проявляется в характерных изломах временных зависимостей  $F$ ,  $p_g$ ,  $k$  и массового расхода  $q(t)$ .

Рисунок 2 имеет методический, а не экспериментальный характер. До порогового момента  $t_c$  повреждение накапливается локально и не образует непрерывного канала разгрузки. При коалесценции дефектов проницаемость возрастает быстрее, чем степень активации, давление газа резко перераспределяется, а массовый вынос достигает максимума при одновременном сохранении градиента давления и потере прочности углепородной пробки выброса. Такой механизм согласуется с представлением о выбросе как о многостадийном энергетически обусловленном процессе [8–14] и с расчетами динамического воздействия на выбросоопасный уголь [20].

### Цифровое описание взрывного и динамического воздействия

Взрывное воздействие рассматривается как технологически управляемый канал подвода энергии к массиву. Современные исследования показывают возможность использования специально спроектированного взрыва для управления напряженным состоянием и характером обрушения кровли [7]. Для исследования механизма разрушения необходимо сохранять сквозную цепочку: детонационное энерговыделение – расширение продуктов взрыва – волновое нагружение – рост поврежденности – формирование активной зоны – дробление и фрагментация.

Для продуктов детонации в сквозной постановке может применяться уравнение состояния JWL

$$p = A(1 - \omega/(R_1 V)) \exp(-R_1 V) + B(1 - \omega/(R_2 V)) \exp(-R_2 V) + \omega E/V \quad (8)$$

где  $V$  – удельный относительный объем;  $E$  – удельная энергия;  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $\omega$  – параметры уравнения состояния. Давление, форма импульса и продолжительность нагружения в этом случае являются результатом расчета. Для горной поро-

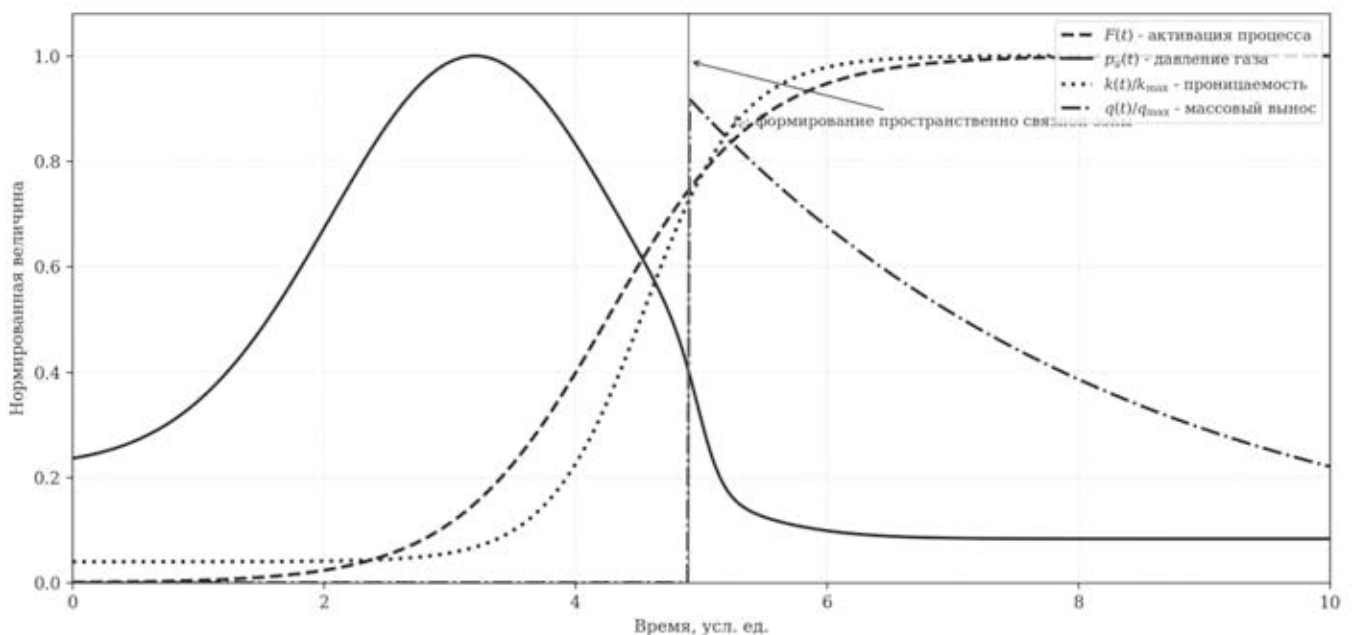


Рис. 2. Схематическая стадийная динамика газомеханического перехода; все величины нормированы /  
Fig. 2. Schematic staged dynamics of the gas-mechanical transition; all quantities are normalized

ды необходимы давлениезависимая прочность, накопление поврежденности и деградация параметров, иначе переход от упругой волны к дроблению будет задаваться численным удалением элементов, а не физической моделью.

Кинетическая структура «иницирование – рост – завершение» известна в феноменологических моделях ударного инициирования энергетических материалов [15]. В геомеханическом приложении переносится только структура пороговой кинетики, но не химико-детонационная физика.

Один из вариантов локального параметра взрывного воздействия имеет вид

$$P_{\text{exp}} = D \left[ \frac{w_{\tau} \tau_{\text{eq}}}{\tau_f(F, p)} + \frac{w_p \langle p \rangle}{p_{\text{ref}}} + \frac{w_E E_{\text{loc}}}{E_{\text{ref}}} \right], \quad (9)$$

где  $D$  – мера исходной или накопленной поврежденности;  $\tau_{\text{eq}}$  – эквивалентное сдвиговое напряжение;  $\tau_f(F, p)$  – текущая прочность;  $p$  положительная для выбранного механизма часть импульсного давления;  $E_{\text{loc}}$  – локально переданная энергия;  $w_{\tau}$ ,  $w_p$  и  $w_E$  – весовые коэффициенты. Такая запись подчеркивает, что результат определяется не только пиковой амплитудой давления, но и длительностью импульса, трещиноватостью, текущим сопротивлением среды и локальным энергетическим балансом. Влияние взрывного воздействия на газодинамическое состояние выбросоопасного угля подробно рассмотрено в работе [20].

#### Достоверность, ограничения и область применения

Доказательность цифровой модели не может основываться только на визуальном соответствии расчетных картин ожидаемому сценарию. Необходимы: проверка законов сохранения массы и импульса; контроль внутренней, кинетической и диссипированной энергии; исследование сходимости положения и размера активной зоны; сопоставление временных масштабов, скоростей, зон разрушения и фрагментации с аналитическими, экспериментальными или натурными данными. Для газомеханической постановки дополнительно контролируются баланс газовой массы и согласованность единиц измерения, для взрывной – применимость параметров уравнений состояния и корректность контакта продуктов взрыва с массивом.

Основные численные неопределенности и ограничения расчетной схемы связаны с растягивающей неустойчивостью SPH, зависимостью ширины зоны локализации от  $h$  и межчастичного расстояния, чрезмерным сглаживанием фронтов,

некорректным заданием искусственной вязкости, нарушением устойчивости явной схемы, ошибками контактного взаимодействия и возможной потерей массы при эрозионных алгоритмах. Поэтому параметры  $F$ ,  $\Psi$  и  $\Psi_c$  не должны рассматриваться как произвольные подгоночные коэффициенты: они идентифицируются по независимым механическим, фильтрационным и энергетическим данным и проверяются на нескольких сценариях нагружения.

Область применения методологии включает сценарный анализ выбросоопасности, формирование поверхностей сдвига, динамическое разрушение приконтурных зон и оценку результатов взрывного воздействия. Методология не заменяет нормативные расчеты промышленной безопасности, а дополняет их инструментом анализа развития переходного события после локального достижения предельного состояния.

#### Закключение

1. Предложена энергетико-кинетическая методология, в которой разрушение массива описывается последовательностью «обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение  $\Psi$  – критическое значение параметра воздействия  $\Psi_c$  – нормированный параметр воздействия  $\Psi/\Psi_c$  – рост  $F$  – формирование активной зоны – локализация – опасное или технологическое событие».

2. Внутренняя переменная  $F$  отделена от классической поврежденности  $D$ :  $F$  характеризует стадию вовлечения локального объема в переходный процесс, а  $D$  – деградацию свойств материала.

3. Модифицированная SPH/SPH-FEM-реализация обеспечивает сопровождение больших деформаций, потери сплошности и фрагментации без априорного задания поверхности разрушения, но требует обязательного контроля величины шага по времени, длины сглаживания, контакта, сходимости и энергетического баланса.

4. Сопряжение механики, проницаемости и газового баланса позволяет интерпретировать выбросоопасный переход как формирование пространственно-связной активной зоны; сквозной расчет взрыва связывает параметры энерговыделения с волновым нагружением, дроблением и фрагментацией.

5. Практическое назначение методологии состоит в расчетном различении субкритических, пороговых и надкритических сценариев и в получении инженерно интерпретируемых показателей для анализа устойчивости, газодинамической опасности и параметров динамического воздействия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lin Q., Cao R., Meng J. Recent Advances in Rock Mass Engineering. *Applied Sciences*. 2025; 15 (23): 12752. <https://doi.org/10.3390/app152312752>.
2. Xie S., Li J., Wang S., et al. An experimental investigation on the dynamic shear characteristics of wet joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2025; 194: 106193. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106193>.
3. Lin Q., Zhang S., Lin H., et al. Failure behavior of jointed rock masses containing a circular hole under compressive-shear load: Insights from DIC technique. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025; 139: 105089. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105089>.
4. Ma Q., Liu X., Tan Y., et al. Experimental study of loading system stiffness effects on mechanical characteristics and kinetic energy calculation of coal specimens. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024; 57: 9941-9957. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04054-7>.
5. Xue H., Wang Y., Yang W., et al. Experimental and numerical study of damage evolution and fracture characteristics of three-layer composite rocks under dynamic loading. *Applied Sciences*. 2025; 15: 10369. <https://doi.org/10.3390/app151910369>.
6. Tang Q., Xie W., Jing S., et al. Experimental and numerical investigation on the mechanical behavior of rock-like material with complex discrete joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024; 57: 4493-4511. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03784-y>.
7. Fu Q., Yang J., Gao Y., et al. Combined blasting for protection of gob-side roadway with thick and hard roof. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024; 16: 3165-3180. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.027>.
8. Lama R. D., Bodziony J. Management of outburst in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology*. 1998; 35 (1-4): 83-115. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(97\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00037-2).

9. Paterson L. A model for outbursts in coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1986; 23 (4): 327-332. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90644-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90644-3).
10. Otuonye F., Sheng J. A numerical simulation of gas flow during coal/gas outbursts. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1994; 12: 15-34. <https://doi.org/10.1007/BF00425934>.
11. Odintsev V. N. Sudden outburst of coal and gas - failure of natural coal as a solution of methane in a solid substance. *Journal of Mining Science*. 1997; 33 (6): 508-516. <https://doi.org/10.1007/BF02765629>.
12. Valliappan S., Zhang W. H. Role of gas energy during coal outbursts. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1999; 44 (7): 875-895.
13. Xu T., Tang C. A., Yang T. H., et al. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006; 43 (6): 905-919. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.01.001>.
14. Wold M. B., Connell L. D., Choi S. K. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2008; 75 (1): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.01.006>.
15. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Physics of Fluids*. 1980; 23 (12): 2362-2372. <https://doi.org/10.1063/1.862940>.
16. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*. 2005; 68 (8): 1703-1759. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>.
17. Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е. Метод сглаженных частиц в моделировании разрушения и обрушения кровли выработки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; S49: 464-475. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-464-475>.
- Malinnikova O. N., Trofimov V. A., Shipovskii I. E. Smoothed particle hydrodynamics in modeling failure and roof caving in a mine working. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018; S49: 464-475. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-464-475>.
18. Говорухин Ю. М., Кубрин С. С. О значениях коэффициентов аэродинамических сопротивлений трения горных выработок больших поперечных сечений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2024; 2: 425-439.
- Govorukhin Yu. M., Kubrin S. S. On the values of aerodynamic friction resistance coefficients for mine workings with large cross-sections. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2024; 2: 425-439. (In Russ.).
19. Говорухин Ю. М., Кубрин С. С. О проницаемости обрушенных и дезинтегрированных пород в выработанном пространстве выемочных участков при высокоинтенсивной отработке пластов угля. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2025; 1: 5-20. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001>.
- Govorukhin Yu. M., Kubrin S. S. On the permeability of caved and disintegrated rocks in the goaf of extraction panels during high-intensity coal seam mining. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2025; 1: 5-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001>.
20. Одинцев В. Н., Шиповский И. Е. Моделирование влияния взрывного воздействия на газодинамическое состояние пачки выбросоопасного угля. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019; 4: 46-57. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190406>.
- Odintsev V. N., Shipovskii I. E. Modeling the effect of blasting on the gas-dynamic state of an outburst-prone coal band. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2019; 4: 46-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190406>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сергей Сергеевич Кубрин –**

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией горнотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: s\_kubrin@mail.ru,

**Иван Евгеньевич Шиповский –**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: iv\_ev@mail.ru

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

**Конфликт интересов:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 10.06.2026

Поступила после рецензирования: 18.06.26

Принята к публикации: 23.06.2026

## ABOUT THE AUTHORS

**Sergey S. Kubrin –**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Mining and Technological Risks in the Development of Gas-Bearing Coal and Ore Deposits, Academic Secretary, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: s\_kubrin@mail.ru,

**Ivan E. Shipovskii –** Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Multiphase Processes in Rock Masses during Deposit Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: iv\_ev@mail.ru

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

**Conflict of interest:**

The authors declare no conflict of interest.

**Article info**

Received: 10.06.2026

Revised: 18.06.26

Accepted: 23.06.2026

## Современные методы крепления горных выработок

С. С. Саркисян✉

ПАО «ГМК «Норильский никель», департамент горного производства, г. Москва, Российская Федерация

✉ [sssdrakon@inbox.ru](mailto:sssdrakon@inbox.ru)

**Резюме.** Рассмотрены вопросы подземной разработки глубоких горизонтов рудных месторождений в условиях высокого горного давления, температур и сейсмической активности. Приведены сведения о технологиях упрочнения рудовмещающих породных массивов, их особенностях при работе в некомфортных условиях. Показаны недостатки технологий упрочнения пород и направления совершенствования. Разработана типизация способов упрочнения рудовмещающего массива. Показано, что методы крепления горных выработок на основе анкерно-торкретных технологий являются приоритетными в горнодобывающих регионах мира, потому что учитывают местные горно-геологические условия и технологические традиции. Дана справка о направлениях решения проблемы в регионах с развитой технологией добычи руд: России, Южной Африке, Китае и др., использующих комбинированные системы с анкерами и набрызг-бетоном и тампонаж. Отмечена перспективность разработки композитных анкеров из неметаллических материалов и создание гибридных конструкций, сочетающих металлическую арматуру с полимерной оболочкой. Обозначена роль интеллектуальных систем мониторинга крепи, роботизации и автоматизации, а также новых материалов и технологий. Отмечена перспективность торкрет-смесей с полимерными составами на основе полиуретанов, надувных армированных оболочек, термостойких крепей и условий мерзлоты. Показано, что технологии крепления характеризуется конверсией от пассивных поддерживающих систем к активным комплексам. Продолжая исследования и обобщая мировой опыт, необходимо создавать надежные и экономичные системы крепления для развития добычи руд на больших глубинах.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, подземная разработка, крепление выработок, упрочнение пород

**Для цитирования:** Саркисян С.С. Современные методы крепления горных выработок. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 86-90. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-86-90>.

## Modern methods of fastening mining workings

S. S. Sargsyan✉

PJSC MMC Norilsk Nickel, Mining Department, Moscow, Russian Federation

✉ [sssdrakon@inbox.ru](mailto:sssdrakon@inbox.ru)

**Abstract.** The issues of underground mining of deep horizons of ore deposits in conditions of high rock pressure, temperatures and seismic activity are considered. Methods: generalization of literary data and statistical reports on the activities of mining enterprises in Russia and abroad. Results. The stages of the development of mining reinforcement technologies have been summarized. Several stages have passed at the mines, due to the capabilities of their era. Information is provided on the technologies of hardening ore-bearing rock arrays, their features when working in uncomfortable conditions. The disadvantages of rock hardening technologies and areas of improvement are shown. A typification of methods for hardening the ore-bearing massif has been developed. It is shown that methods of fastening mine workings based on anchor-shotcrete technologies are a priority in mining regions of the world, because they take into account local mining and geological conditions and technological traditions. A reference is given on the directions of solving the problem in regions with advanced ore mining technology: Russia, South Africa, China, etc., using combined systems with anchors and sprayed concrete and grouting. The prospects of developing composite anchors from non-metallic materials and creating hybrid structures combining metal reinforcement with a polymer shell are noted. The role of intelligent support monitoring systems, robotization and automation, as well as new materials and technologies is outlined. The prospects of shotcrete mixtures with polymer compositions based on polyurethanes, inflatable reinforced hoods, heat-resistant fasteners and permafrost conditions are noted. Conclusion. It is shown that fastening technologies are characterized by conversion from passive support systems to active complexes. Continuing research and generalizing world experience, it is necessary to create reliable and economical fastening systems for the development of ore mining at great depths.

**Keywords:** ore deposits, underground mining, rock fixing, rock hardening

**For citation:** Sargsyan S.S. Modern methods of fastening mining workings. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 86-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-86-90>.

## Введение

**Крепление горных выработок** – создание конструкций для недопущения критических форм горного давления, обеспечение безопасной работы людей и оборудования. Подземная разработка глубоких горизонтов рудных месторождений сопровождается ростом горного давления, температур и сейсмической активности массива. Традиционные способы крепления выработок на больших глубинах становятся неэффективными.

Природо- и ресурсосберегающие технологии подземной разработки месторождений сложной структуры становятся труднее реализовывать без прогнозирования геомеханического состояния массива, особенно при смещении горных работ на глубокие горизонты месторождений. Становится необходимой комплексная оценка геоэкологических рисков при осуществлении открытых и подземных горных работ [1–4].

В ходе исследований пригодности строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства и реализации проектов крепи для подземной рудничной инфраструктуры получены представительные результаты устойчивости бетонных крепей при проходке и креплении сверхглубоких горных выработок рудника «Скалистый» ГМК «Норильский никель» [5–8].

Развитие технологий крепления горных выработок на рудниках прошло несколько этапов, обусловленных техническими возможностями эпохи. Ранние стадии развития горного дела базировались на деревянных материалах. В XX веке были освоены металлические арочные крепи из стального проката.

Революционным моментом в технологии крепления стало внедрение анкерной крепи в 1970–1980-е годы. Механизация процессов крепления стала существенным фактором перехода к новым технологиям. На российских рудниках переход от старых схем крепления к анкерной технологии начался в 2000-х годах. Оценка результатов применения анкерной крепи дает основание считать ее одним из важнейших элементов ресурсосберегающих технологий освоения месторождений полезных ископаемых в энергонарушенных горных массивах наряду с закладкой выработанного пространства бетонами [9–12].

Технологические новации в ходе освоения новых видов шахтной крепи активизировали эмпирические методики оценки состояния массива горных пород и подтвердили жизнеспособность принципов формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов [13–16].

Современный уровень управления горным давлением характеризуется конверсией на комбинированные методы крепления. Будущее крепления горных выработок связано с механизацией, автоматизацией и интеллектуализацией процессов. Развитие технологий идет по нескольким основным направлениям, каждое из которых открывает новые возможности для повышения эффективности и безопасности рудничного производства [17–20].

Системы крепления горных выработок при подземной разработке, в том числе технологии анкерного, торкрет-бетонного и комбинированного крепления, являются объектом систематических исследований.

**Цель работы:** обоснование надежных и экономичных систем крепления для развития добычи руд на больших глубинах.

## Методы

Обобщение литературных публикаций, патентных данных и статистических отчетов о деятельности горных пред-

приятий России и зарубежья за 20 лет. Анализ прогнозов о судьбе горного производства в близкой перспективе.

## Результаты

**Анкерная крепь** представляет собой систему стержней, закрепляемых в шпурах и размещаемых в приконтурной зоне выработки (рис. 1).

Первые анкерные системы в практике крепления представляли собой стальные штанги, закрепляемые цементным раствором, и имели недостаток: медленное твердение цемента (до 4 часов), что снижало темп и безопасность работ.

Химическое закрепление анкеров основано на использовании быстротвердеющих полимерных смол. Уже через 5–10 с крепь набирает несущую способность.

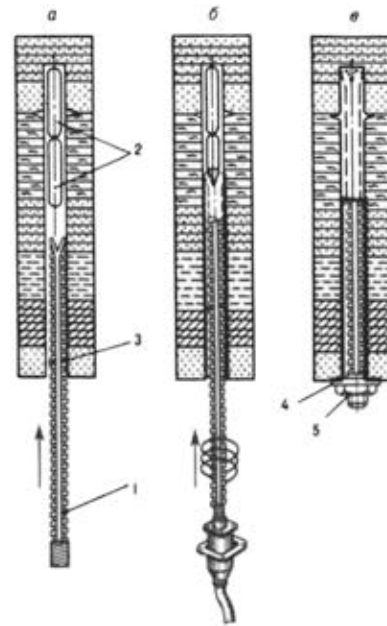


Рис. 1. Анкерная крепь: 1 – анкерный стержень; 2 – двухкомпонентная ампула; 3 – профиль; 4 – опорная плита; 5 – гайка-натяжитель / Fig. 1. Anchorage: 1 – anchor rod; 2 – two-component ampoule; 3 – profile; 4 – base plate; 5 – nut tensioner

Сталеполимерные анкерные крепи воспринимают нагрузку 150...200 кН, что сопоставимо с несущей способностью металлических рам.

**Фрикционные анкеры** представляют собой трубчатый стержень из стали с продольной прорезью. Самозакрепляющийся анкер забивается в шпур меньшего диаметра и фиксируется без цемента или смолы.

Несущая способность таких анкеров (50...80 кН) не высока, поэтому они применяются для временной крепи или работают совместно с другими системами крепи.

**Канатные анкеры** собой гибкие стержни из стальных канатов диаметром 15–25 мм, устанавливаемые в длинные шпуры (5–8 м) и закрепляемые цементным раствором или смолами. Короткие анкеры (2–3 м) закрепляют приконтурную зону, а над ними устанавливают длинные анкеры.

**Самозабуривающиеся анкерные системы** – полые стержни с буровым наконечником одновременно служат буром для создания шпура и способом подачи закрепляющего состава.

**Набрызг-бетон (торкрет-бетон)** представляет собой метод нанесения бетонной смеси на поверхность горных пород под давлением сжатого воздуха или насосных установок. Торкрет-бетон создает сплошную армированную оболочку,

скрепляющую потрескавшиеся породы вокруг выработки и препятствующую вывалам породы.

**Фиброволокна.** Добавление в бетонную смесь стальных или синтетических фиброволокон длиной 25–35 мм позволяет создавать фибробетон, выполняющий функции сетки по удержанию отслоившихся фрагментов породы и препятствию распространения трещин.

**Комбинированные крепи.** В близкой перспективе увеличивается практика комбинирования крепей анкеров и торкрет-бетона. Анкеры обеспечивают стабилизацию глубинных слоев массива, а набрызг-бетон с фиброй или сеткой укрепляет контур выработки, образуя защитную оболочку (рис. 2).

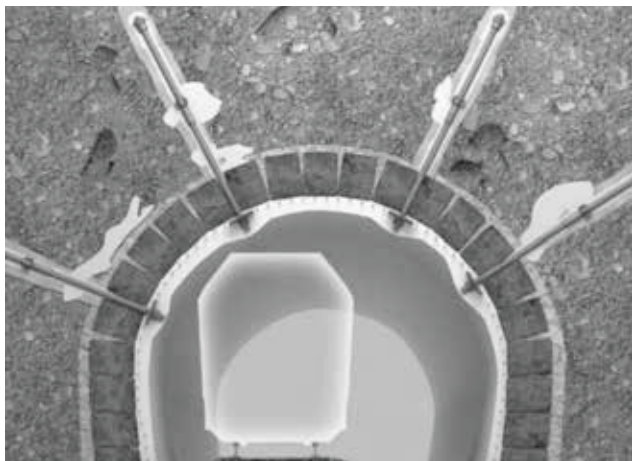


Рис. 2. Комбинированная крепь (анкера, сетка, набрызг-бетон) / Fig. 2. Combined fastener (anchors, mesh, spray-concrete)

Оптимальным считается следующий подход: после взрывных работ и уборки отбитой породы наносится тонкий слой торкрет-бетона для закрепления рыхлых фрагментов пород. Затем производится установка анкеров, монтируются армирующие элементы, и наносится слой набрызг-бетона до проектной толщины.

**Армопояса и тензорные ремни** усиливают комбинирован-

ную крепь. Армопояса представляют собой пространственные конструкции из стальной арматуры, которые устанавливаются между анкерами и торкрет-слоем. Тензорные ремни – стальные пластины, длиной 2,5–3 м, выполняют роль гибких ребер жесткости. Одна пластина размером 2,5 × 0,3 м весит около 10 кг, тогда как эквивалентная по функциям арка – в десятки раз больше.

**Инъекционное упрочнение массива** укрепляет раздробленный массив путем нагнетания в трещины тампонажных составов, повышая прочность массива.

**Тампонажные составы.** В качестве тампонажных материалов применяются цементные растворы, полиуретановые смолы, силикатные гели и другие составы, выбор которых определяется сплошностью пород, наличием водопритока и требуемой прочностью закрепления. Технология инъекционного закрепления включает в себя бурение скважин в зоне ослабления пород, установку пакеров и нагнетание раствора.

**Пустотелые анкера.** Совмещение анкерного крепления с инъекционным упрочнением выполняет функции механического закрепления пород и каналов подачи тампонажного раствора. Анкеры фиксируют породу и служат каналами для нагнетания.

Демпфирующие смеси характеризуются способностью деформирования без разрушения и эффективны в сочетании с податливыми анкерными системами.

Способы упрочнения рудомещающего массива обобщены в таблице.

#### Обсуждение

Современные методы крепления горных выработок, основанные на анкерно-торкретных технологиях, получили распространение во всех горнодобывающих регионах мира. При общности базовых принципов в различных странах сформировались специфические подходы, обусловленные местными горно-геологическими условиями и технологическими традициями.

**В России** переход к технологиям крепления начался в 2000-х годах. Примером служат норильские рудники, где произошла полная замена железобетонных штанг на хими-

Таблица / Table

Способы упрочнения пород / Methods of rock hardening

| Вариант                   | Сущность                                                                  | Недостатки                                                                  | Совершенствование                                  |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Химическое закрепление    | Закрепление полимерными смолами                                           | Повышенные затраты времени                                                  | Использование двухкомпонентных закрепителей        |
| Фрикционное закрепление   | Фиксируются за счет распора                                               | Несущая способность ограничена                                              | Увеличение количества распорных элементов          |
| Канатные анкера           | Установление в шпury и закрепление цементом стальных канатов              | Сложность контроля                                                          | Подбор материалов                                  |
| Самозабуривающиеся анкера | Полые стержни с буровым наконечником, заполняются двухкомпонентной смолой | Сложность установки                                                         | Совершенствование заполнения шпура закрепителем    |
| Набрызг-бетонирование     | Смесь на выходе из сопла или подается извне                               | Повышенная запыленность, неоднородность покрытия и малая производительность | Совершенствование смесителей                       |
| Фиброволокна              | Стальная сетка навешивается на анкера и покрывается набрызгбетоном        | Сложная организация работ                                                   | Применение сухих смесей с добавлением фиброволокна |
| Комбинированные крепи     | Сочетание анкеров и торкрет-бетона                                        | Сложная организация работ                                                   | Оптимизация совместимости элементов                |
| Армопояса                 | Стальная арматура и торкрет-слой                                          | Сложная организация работ                                                   | Совершенствование организации работ                |
| Тензорные ремни           | Стальные пластины поверх крепи являются гибкими ребрами жесткости         | Сложная организация работ                                                   | Совершенствование организации работ                |
| Инъекционное упрочнение   | Укрепление массива нагнетанием тампонажных составов                       | Только для скальных пород                                                   | Совершенствование организации работ                |

ческую анкерную крепь. На Южном Урале испытания усиленной комбинированной крепи продемонстрировали возможность отказа металлических арок с сокращением затрат почти на 50 % по сравнению с арочной крепью.

Результаты исследований анкеров иллюстрируются рисунком 3.

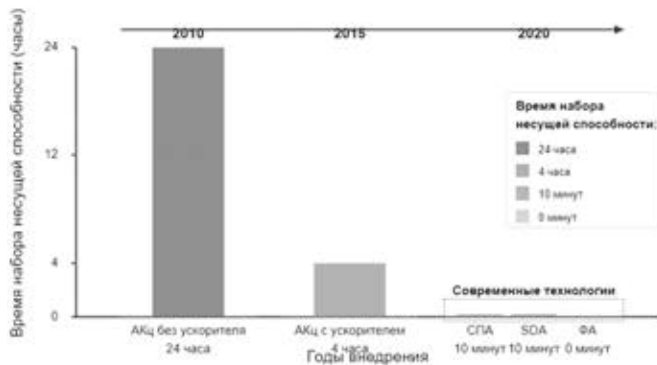


Рис. 3. Скорость набора несущей способности анкерами /  
Fig. 3. The rate of gain of bearing capacity by anchors

**Южная Африка**, обладающая самыми глубокими рудниками мира, стала полигоном для испытания систем крепи: от гидравлических стоек и энергоемких деревянных элементов до динамических анкеров и тензорных ремней. Особенностью южноафриканского подхода является комбинирование принципов крепления: акцент на энергоемкость для поглощения динамических воздействий и сверхпрочное удержание для критически важных участков.

**В Китае** используются комбинированные системы с анкерами и набрызг-бетоном и тампонаж. Национальные научные центры разрабатывают оригинальные анкера, рецепты торкрет-смесей и методы управления горным давлением.

**Композитные и пластиковые анкера нового поколения.** Перспективна разработка композитных анкеров из неметаллических материалов. Пластиковые анкера преодолели главные недостатки: хрупкость и низкую сдвигоустойчивость.

Перспективно создание гибридных конструкций, сочетающих металлическую арматуру с полимерной оболочкой.

**Интеллектуальные системы** «умной» крепи предполагают оснащение анкеров и других элементов датчиками, прогнозирующими состояние выработки. Системы мониторинга позволяют контролировать качество крепи в реальном вре-

мени и выявлять потенциально опасные участки до развития аварийных ситуаций. Перспективно создание автоматизированных систем управления крепью, способных адаптировать параметры поддержания к изменяющимся условиям.

**Роботизация и автоматизация.** Самоходные бурильно-крепежные машины могут стать роботизированными и управляемыми дистанционно. Роботизированные системы способны работать в условиях повышенной запыленности, температуры и радиации.

**Новые материалы и технологии.** В области материаловедения перспективны составы торкрет-смесей, полимерные составы для моментального закрепления пород на основе полиуретанов.

Исследуются возможности применения 3D-печати бетонных конструкций и надувных армированных оболочек. Для рудников с высокими температурами разрабатываются термостойкие крепи и системы охлаждения. Для условий мерзлоты создаются специальные составы.

### Закключение

Технологии крепления горных выработок характеризуется переходом от пассивных поддерживающих систем к активным комплексам управления состоянием массива.

Состояние отрасли характеризуется гибкостью технологических решений: спектром вариантов от легких фрикционных анкеров до сложных многоуровневых систем с канатными анкерами, фибробетоном и армирующими конструкциями.

Композитные материалы, прежде всего новые поколения пластиковых анкеров, решают проблемы коррозии и снижения металлоемкости. Полимерные композиты преодолели недостатки: хрупкость и низкую сдвигоустойчивость, открывая широкие перспективы применения.

Системы мониторинга, роботизированные крепежные комплексы и адаптивные технологии управления создают принципиально новый уровень безопасности и эффективности производства.

Крепь представляет собой не просто пассивную поддержку выработки, а комплекс мероприятий по активному управлению состоянием горного массива. Продолжая исследования и обобщая мировой опыт, специалисты создают все более надежные и экономичные системы крепления, обеспечивая устойчивое развитие добычи полезных ископаемых на больших глубинах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дзапаров В.Х., Харебов Г.З., Стась В.П., Стась П.П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства. *Сухие строительные смеси*. 2020; 1: 35-38.  
Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Z., Stas V.P., Stas P.P. Investigation of dry building mixes based on industrial waste for underground construction. *Dry building mixes*. 2020; 1: 35-38. (In Russ.).
2. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020; 2: 283-290.  
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountainous territories*. 2020; 2: 283-290. (In Russ.).
3. Яицкая Н.А., Бригида В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2022; 12 (1): 162-173.  
Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems: spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Southern Russia*. 2022; 12 (1): 162-173.
4. Li L., Shang C., Chu K., et al. Large-scale geo-mechanical model tests for stability assessment of super-large cross-section tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021; (109): 5-9.

5. Голик В.И., Качурин Н.М., Стась Г.В., Лискова М.Ю. К природо- и ресурсосберегающим технологиям подземной разработки месторождений сложной структуры. *Безопасность труда в промышленности*. 2022; 9: 22-27.  
Golik V.I., Kachurin N.M., Stas G.V., Liskova M.Yu. Towards natural and resource-saving technologies for underground mining of deposits of complex structure. *Occupational safety in industry*. 2022; 9: 22-27. (In Russ.).
6. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой. *Записки Горного института*. 2022; 253: 61-70.  
Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kuziev D.A., et al. Forecasting the geomechanical state of the massif during the development of salt deposits with masonry. *Notes of the Mining Institute*. 2022; 253: 61-70. (In Russ.).
7. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3 (49)): 405-415.  
Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountainous territories*. 2021; 13 (3 (49)): 405-415. (In Russ.).
8. Sajjad Chehreghani, Hossein Azad Sola, Hamid Chakeri. Stability analysis and support system design of Angouran underground mine batching room. *Mining of Mineral Deposits*. 2022; 16 (1): 92-100. <https://doi.org/10.33271/MINING16.01.092>.
9. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2022; 2: 68-76.  
Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical methods for assessing the condition of a rock mass. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining Journal*. 2022; 2: 68-76. (In Russ.).
10. Zemskov A.N., Liskova M.Yu., Sharipzyanova G.Kh. Regularities of changes in the gas-dynamic and geomechanical situation at potash mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021; 13(3): 426-432. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-426-432>.
11. Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. Экологическая и горнотехническая безопасность разработки месторождений в энергонарушенных горных массивах: проблемы и перспективы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021; 3 (113): 43-55.  
Lyashenko V.I., Vorobyov A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Environmental and mining safety of field development in energy-damaged mountain ranges: problems and prospects. *Surveying and Subsurface Use*. 2021; 3 (113): 43-55. (In Russ.).
12. Talibe Keita A.M., Jahanbakhshzadeh A., Li L. Numerical analysis of the failure mechanisms of sill mats made of cemented backfill. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2022; 16: 16.
13. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024; 16 (1): 205-216. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216>.  
Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Comprehensive assessment of geoeological risks in open-pit and underground mining operations. *Sustainable development of mountainous territories*. 2024; 16 (1): 205-216 (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216>.
14. Зейнуллин А.А., Абеуов Е.А., Демин В.Ф. и др. Оценка способов поддержания горных выработок на основе применения анкерной крепи на шахтах Карагандинского угольного бассейна. *Уголь*. 2021; 2: 4-9. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-4-9>.  
Zeynullin A.A., Abeuov E.A., Demin V.F., et al. Assessment of methods for maintaining mine workings based on the use of anchorage in the mines of the Karaganda coal basin. *Coal*. 2021. No. 2. pp. 4-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-4-9>.
15. Плешко М.С., Лобанов Е.А., Муштекенов Т.С., Волков Д.С. Опыт проходки и крепления сверхглубоких горных выработок рудника «Скалистый» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». *Горный журнал*. 2022; (7): 32-37. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.05>.  
Pleshko M.S., Lobanov E.A., Mushtekenov T.S., Volkov D.S. The experience of sinking and fixing ultra-deep mining workings of the Rocky mine of PJSC MMC Norilsk Nickel. *Mining Journal*. 2022; (7): 32-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.05>.
16. Zeqiri K., Ibishi G., Shabani M., et al. Preliminary support design for underground mine adit, Artana Mine, Kosovo. *Mining Science*. 2021; 28: 141-159. <https://doi.org/10.37190/Msc212811>.
17. Semenova I.E., Kulkova M.S. The stress distribution around the mining excavations under different tectonic loads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 833: 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012127>.
18. Козырев А.А., Константинов К.Н., Лобанов Е.А. и др. Оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности глубоких выработок рудника «Скалистый» комплексом натурных методов. *Горная промышленность*. 2023; (5): 108-113. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108>.  
Kozyrev A.A., Konstantinov K.N., Lobanov E.A., et al. Assessment of the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of deep mine wells "Rocky" by a complex of natural methods. *Mining industry*. 2023; (5): 108-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108>.
19. Wang R., Zeng F., Li L. Stability analyses of side-exposed backfill considering mine depth and extraction of adjacent stope. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. (142).
20. Каунг П.А., Исаков А.Е., Панфилов И.А. и др. Принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024; 7-1: 159-175. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_71\\_0\\_159](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_159).  
Kaung P.A., Isakov A.E., Panfilov I.A., et al. Principles of formation of environmentally safe and economically effective sustainable development of georesources. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2024; 7-1: 159-175. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_71\\_0\\_159](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_159).

## ОБ АВТОРЕ

**Сергей Самвелович Саркисян –**  
инженер отдела процессного сопровождения горного  
производства управления горного производства департамента  
горного производства дирекции сопровождения производства  
ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Москва, Российская  
Федерация; e-mail: sssdrakon@inbox.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.06.2026  
Поступила после рецензирования: 26.06.2026  
Принята к публикации: 30.06.2026

## ABOUT THE AUTHOR

**Sergey S. Sargsyan –**  
PJSC MMC Norilsk Nickel, Engineer, Mining Process Support  
Department of the Mining Production Department, Mining  
Production Department, Production Support Directorate,  
Moscow, Russian Federation; e-mail: sssdrakon@inbox.ru

## Article info

Received: 20.06.2026  
Revised: 26.06.2026  
Accepted: 30.06.2026



@minexrussia  
TG Канал

**МАЙНЕКС 2026  
РОССИЯ**

7–8 октября 2026 года Москва, Рэдиссон Славянская

## **22-Й СЕЗОН ГЛАВНОГО ГОРНОГО ФОРУМА СТРАНЫ**

МАЙНЕКС Россия — это не просто крупнейшая площадка для обсуждения геологии, добычи и сырьевой политики. Это место, где формируются решения, определяющие будущее минерально-сырьевого комплекса России.

- ♦ Стратегические сессии и отраслевые дискуссии
- ♦ Инновации, технологии, цифровые решения для ГРП, добычи и переработки
- ♦ Презентации проектов и инвестиционные панели
- ♦ Федеральные регуляторы, компании-недропользователи, научные центры, инвесторы и подрядчики
- ♦ Выставка оборудования, технологий и сервисов
- ♦ Networking нового поколения — с персональной системой встреч и цифровыми бизнес-картами

**БУДЬТЕ СРЕДИ ТЕХ, КТО ОПРЕДЕЛЯЕТ ПРАВИЛА  
И СОЗДАЁТ БУДУЩЕЕ ОТРАСЛИ.**

0+

[minexrussia.ru](https://minexrussia.ru)



@minexrussia  
ТТ Канал



# РОССЫПНОЕ ЗОЛОТО РОССИИ

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФОРУМ

19–20 августа 2026 года, Хабаровск

## ВСЕРОССИЙСКИЙ ФОРУМ (ВФР) «РОССЫПНОЕ ЗОЛОТО РОССИИ: ПУТИ РАЗВИТИЯ, РЕГУЛИРОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ»

Всероссийский форум «Россыпное золото России: пути развития, регулирование, технологии» — ключевая площадка страны, посвящённая вопросам геологоразведки, добычи и переработки россыпного золота.

Форум охватывает полный цикл — от поисков и оценки до добычи, переработки и экологической ответственности. Это пространство прямого диалога, обмена опытом и формирования единых отраслевых подходов. Россыпное золото — это часть национального ресурсного суверенитета, а Хабаровский форум — площадка, где создаются решения для его будущего.

На одной площадке собираются:

- ♦ представители россыпной отрасли всех регионов России
- ♦ государственные ведомства и регулирующие органы
  - ♦ производители оборудования и технологий
  - ♦ геологоразведочные и добывающие компании
- ♦ научные центры, консалтинговые и инженерные организации

DVO.MINEXRUSSIA.RU

0+

