

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

№ 5, сентябрь-октябрь 2024 г.

www.n-gn.ru

«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»



Российская Академия Наук

*Международная конференция
«Тлаксинские чтения - 2024»*

MiningWorld Russia

29-я Международная выставка
машин и оборудования
для добычи, обогащения
и транспортировки
полезных ископаемых

Забронируйте стенд
miningworld.ru

23–25 апреля 2025
Москва, Крокус Экспо



ОРГАНИЗАТОР
ORGANISER



Научно-технический и производственный журнал



№ 5

Сентябрь-Октябрь 2024 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 массовых коммуникаций, связи и охраны культурного
наследия. Свидетельство о регистрации 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 «CLUB PRINT»

тел.: +7(495) 669 5009

ISSN 2079-3332



24 003



9 772079 333778



© ООО «Издательский дом «Недропользование
и горные науки»

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, ФИЦ УрО РАН, г. Пермь, РФ

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

В. А. Гордеев – д.т.н., проф., кафедра «Кадастр и Геоинженерия» Кубанского государственного технологического университета, Член центрального Совета Союза маркшейдеров России, г. Краснодар, 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. Трубецкий – академик РАН, д.т.н., проф., советник президиума РАН, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

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

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

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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



№ 5

September-October 2024

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 Mass communications, communication and protection of cultural heritage 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 Subsoil Use» required

The magazine was printed in the printing house «**CLUB PRINT**»
phone: +7(495) 669 5009

ISSN 2079-3332



24 003



9 772079 333778



© Publishing House Minerals Management
and Mining Sciences, LLC

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 A. Gordeev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Cadastre and Geoengineering of Kuban State Technological University, Member of the Central Council of the Union of Surveyors of Russia, Krasnodar, 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 Marnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Kliment N. Trubetskoy – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Advisor to the Presidium of the RAS, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Maxim A. 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. Khoreshek – 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

ИТОГИ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ

Решение Международной конференции «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» («Плаксинские чтения – 2024»)

Вячеславу Николаевичу Калмыкову – 85 лет

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

В. Л. Яковлев, В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов
Методика оценки геологических баз данных с целью районирования в карьере технологических типов и сортов руд

В. И. Голик, А. С. Выскребенец, Р. И. Миргалиев, К. К. Мулухов, В. Н. Хетагуров

Направления модернизации технологий подземной добычи руд

А. А. Кравцов, В. А. Атрушкевич

Обзор современного применения гидротехнологии при добыче угля

В. Т. Хунг

К концепции совершенствования подземной разработки месторождений сложной структуры с бетонной закладкой

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

И. В. Артемов, М. Б. Носырев

Технология цифровых двойников и ее применение в горнодобывающей промышленности

ОБОГАЩЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В. А. Иодис, С. О. Очеретяна

Исследование влияния ультразвукового воздействия на кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания металлов

Р. С. Вopilin, В. А. Иодис

Каскадная реакторная установка для бактериально-химического выщелачивания руд

С. О. Очеретяна

Оптимизация питательной среды для культивирования в шейкер-инкубаторе автохтонной смешанной культуры, выделенной с окисленной руды месторождения Шануч

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. И. Фомин, А. Лелен, А. С. Говоров

Оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений

ПРАВОВЫЕ ВОПРОСЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

М. В. Писаренко, В. В. Аксенов, С. В. Шаклеин

Совершенствование схемы исчисления налога на добычу угля

RESULTS OF SCIENTIFIC CONFERENCES

Decision of the International Conference «Innovative processes of enrichment and deep processing of rare metal and mining chemical raw materials and complex ores of non-ferrous and ferrous metals» («Plaksin readings – 2024»)

Vyacheslav Nikolaevich Kalmykov is 85 years old

GEOTECHNOLOGY

V. L. Yakovlev, V. D. Kantemirov, A. M. Yakovlev, R. S. Titov

Methodology for evaluating geological databases for the purpose of zoning technological types and grades of ores in open-pits

V. I. Golik, A. S. Vyskrebenets, R. I. Mirgaliev,

K. K. Mulukhov, V. N. Khetagurov

Directions of modernization of underground ore mining technologies

A. A. Kravtsov, V. A. Atrushkevich

Review of modern application of hydraulic technology in coal mining

V. T. Hung

Some aspects of improving underground mining deposits of complex structure with a concrete filling

INFORMATION TECHNOLOGY

I. V. Artemov, M. B. Nosyrev

The digital twin technology and its application for mining industry

ENRICHMENT AND PROCESSING OF MINERALS

V. A. Iodis, S. O. Ocheretyana

Study of the influence of ultrasonic influence on the kinetics of the process of bacterial-chemical leaching of metals

R. S. Vopilin, V. A. Iodis

Cascade reactor plant for bacterial-chemical leaching ore

S. O. Ocheretyana

Optimization of nutrient medium for cultivation in a shaker incubator of an autochthonous mixed culture isolated from oxidized ore of the Shanuch deposit

THEORETICAL FOUNDATIONS OF MINING ENGINEERING SYSTEMS DESIGN

S. I. Fomin, A. Lelen, A. S. Govorov

Project decisions reliability assessment of definition opencast mining parameters and indicators

LEGAL ISSUES OF MINERAL RESOURCES MANAGEMENT

M. V. Pisarenko, V. V. Aksenov, S. V. Shaklein

Conceptual approaches to taxation coal mining

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

*И. В. Корнеев, Ал. А. Галимьянов,
В. И. Мишнев, Е. Н. Казарина*

Эффективность применения дефлагирующего состава
для дробления негабаритных кусков породы горной массы

Б. В. Хохлов

К оценке условий эффективности упрочнения
обводненных пород

*Б. Б. Луганцев, А. И. Чавкин, Ю. В. Турук,
Е. А. Гревцева, Н. Б. Афонина*

Применение двухуровневой анкерной крепи в выемочных
выработках на больших глубинах

Д. С. Лепетюха, С. Д. Яцыняк, И. В. Синица

Мониторинг деформационных процессов горных пород в
условиях Гремячинского месторождения калийных солей

ЭКОЛОГИЯ

Ю. П. Галченко

Влияние структуры нарушенных земель на экологические
последствия недропользования при разработке рудных
месторождений

А. Амин Бабатунде, О. Аджайи Адедайо

Мониторинг окружающей среды в промышленных зонах
Западной Африки

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

*Р. Е. Левитин, С. Е. Аксенов, Н. С. Ульянов,
А. П. Терешонок*

Геодетический мониторинг деформаций надземных
трубопроводов при использовании беспилотных
летательных аппаратов в труднодоступных
арктических районах

С. Ю. Новоженин, Е. А. Волошина, А. В. Маркус

Прогнозная оценка сдвижений и деформаций карьера
криволинейной формы

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В. Анищенко

Определение достижимых рабочих параметров
конвейерных систем подачи труб для бестрашнейного
трубопроводного строительства и скважинной добычи
полезных ископаемых

НЕКРОЛОГИ

Памяти Г. В. Орлова

GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION

*I. V. Korneev, Al. A. Galimyanov,
V. I. Mishnev, E. N. Kazarina*

The effectiveness of using a deflagrating compound for crushing
oversized pieces of rock

B. V. Khokhlov

To assess the conditions for the effectiveness of hardening
watered rocks

*B. B. Lugancev, A. I. Chavkin, J. V. Turuk, E. A. Grevtseva,
N. B. Afonina*

The use of two-level anchorage in excavation workings
at great depths

D. S. Lepetyukha, S. D. Yatsynyak, I. V. Sinitsa

Monitoring deformation processes of rocks in the
Gremyachinskoe potassium salts deposit

ECOLOGY

Yu. P. Galchenko

The influence of the disturbed land structure on the
environmental consequences of subsurface use in the
development of ore deposits

A. Ameen Babatunde, O. Ajayi Adedayo

Environmental monitoring in industrial zones of West Africa

SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT OF MINING OPERATIONS

*R. E. Levitin, S. E. Aksenov, N. S. Ulyankin,
A. P. Tereshonok*

Geodetic monitoring of deformations of above ground pipelines
using unmanned aerial vehicles in difficultly accessible arctic
areas

S. Yu. Novozhenin, E. A. Voloshina, A. V. Markus

Predictive assessment of displacements and deformations of a
curvilinear quarry

MINING MACHINERY AND EQUIPMENT

V. Anishchenko

Defining working parameters of conveyor-type pipe feeding
systems for trenchless pipeline installation and mining

NECROLOGY

In memory of G. V. Orlov

РЕШЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБОГАЩЕНИЯ И ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО И ГОРНО-ХИМИЧЕСКОГО СЫРЬЯ И КОМПЛЕКСНЫХ РУД ЦВЕТНЫХ И ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ» (Плаксинские чтения – 2024)

Научный совет Российской академии наук по проблемам обогащения полезных ископаемых, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук» (ИПКОН РАН), Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (КНЦ РАН), Горный институт — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН) провели Международную конференцию «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» (Плаксинские чтения – 2024). Конференция проходила 23–27 сентября 2024 года в городе Апатиты — научной столице Кольского Заполярья.

Традиционно конференция собрала представителей академической и отраслевой науки, крупных горно-перерабатывающих компаний и компаний, которые, отвечая современным потребностям России в освоении стратегических ресурсов, показали высокий уровень знаний и профессионализма ученых, поддержала неизменный статус Международной конференции, проявляя внимание и уважение к представителям зарубежной науки из Китая, Мьянмы, Узбекистана, Казахстана, Киргизии.

Знаменательно, что конференция проводилась в год 300-летия Российской академии наук. В этой связи важно отметить, что первым выборным президентом РАН был именно горный инженер — выдающийся ученый Александр Петрович Карпинский.



Участники Международной конференции «Плаксинские чтения - 2024»

Своим названием — «Плаксинские чтения» — конференция, проводимая 48-й раз, отдает дань памяти Игорю Николаевичу Плаксину — члену-корреспонденту АН СССР, дважды лауреату Государственной премии СССР, основателю научной школы обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии редких, цветных и благородных металлов. Научное наследие, оставленное этим замечательным человеком, трудно переоценить. Его труды и сегодня имеют непрекращаемую актуальность и значимость для ученых и практиков в России и за рубежом.

В работе конференции участвовали 175 представителей из 59 организаций, в том числе 22 академических и отраслевых институтов и 10 вузов, 27 крупных горно-обогатительных компаний.

В работе пленарного заседания и секций конференции приняли участие 2 действительных члена Российской академии наук, 3 члена-корреспондента Российской академии наук, 28 докторов наук, 33 кандидата наук.

В этом году Плаксинские чтения проводились на базе Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН) — единственного в России федерального исследовательского центра, расположенного за Полярным кругом. Основанный в 1930 году академиком Александром Евгеньевичем Ферсманом, Кольский научный центр неизменно был и остается форпостом отечественной академической науки в русском Заполярье.

Тема конференции «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» как нельзя точно и ёмко отражает содержание задач, поставленных временем перед наукой обогащения полезных ископаемых. Данные задачи обусловлены не столько развитием технологий переработки полезных ископаемых и состоянием горно-перерабатывающих предприятий, сколько объективными тенденциями развития мировой экономики, ориентированными на новые материалы, повышение качества традиционных концентратов для черной, цветной и редкометаллической промышленности, растущим спросом на продукты переработки горно-химического сырья. Важно и то, что, наверное, как нигде в мире, локализация этих задач высока на Кольском полуострове — в минерально-сырьевом источнике Арктической зоны Российской Федерации. И, как нигде в мире, именно здесь благодаря усилиям нескольких поколений сформирован замечательный пример тесного сотрудничества фундаментальной науки и горно-обогатительных производств.

Мурманская область — это передовые предприятия компаний ПАО «ФосАгро», ПАО «Акрон», ПАО «Северсталь», ПАО «ГМК Норильский никель», госкорпорация «Росатом», АО «МХК «ЕвроХим», АО «Аркминерал-Ресурс», обеспечивающие потребности России и зарубежных партнеров в апатитовом концентрате, нефелиновом и керамическом сырье, флогопите, ниобии, тантале, редкоземельных металлах, никеле, меди, кобальте, железорудном концентрате. Деятельность этих компаний — залог социально-экономического обустройства территории Мурманской области и в целом экономической стабильности России. Отличительной чертой пленарных лекций прошедшей конференции является растущее внимание ученых к проблемам глубокой переработки редкометаллических руд, горно-химического сырья, комплексных руд цветных и черных металлов. Наряду с решениями, позволяющими получать высокотехнологичные материалы и металлы, представлены вопросы совершенствования технологий обогащения полезных ископаемых, проведен анализ состояния и развития минерально-сырьевой базы Кольского полуострова и анонсирован интенсивно стартующий Африкандский проект освоения месторождения стратегического минерального сырья. Практически все пленарные лекции раскрывают инновационность решений, предлагаемых современной наукой, что является основой дальнейшего тесного сотрудничества ученых и горно-обогатительных предприятий.

Конференция отмечает актуальность решаемых научных задач, междисциплинарный подход, применяемый в современных исследованиях, важность и высокую практическую значимость получаемых научных результатов, стабильный рост активного участия в научно-исследовательских работах молодых ученых.

Работа конференции проходила в пяти секциях.

На секции «Современные технологические решения в процессах переработки минерального сырья» заслушано 8 докладов, из них 3 доклада сделано молодыми учеными. Доклады отличались широким спектром научных проблем переработки



Академик РАН, проф., д.т.н., советник РАН, председатель Научного совета РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых, главный научный сотрудник ИПКОН РАН Валентин Алексеевич Чантурия (справа) и главный редактор журнала «Маркшейдерия и недропользование», зав. отделом ИПКОН РАН, проф., д.т.н. Юрий Витальевич Дмитрак (слева)



Работа конференции

минерального сырья. Затронуты вопросы обоснования моделирования процессов разрушения горных пород, использования в переработке руд экстремальных физических условий и наукоемких, высокотехнологичных методов сепарации, расширения ресурсной базы за счет вовлечения в переработку хвостов обогащения.

На секции «Технологическая минералогия, рудоподготовка, тонкое и сверхтонкое измельчение минерального сырья» представлено 18 докладов, из них 9 докладов сделано молодыми учеными. Важность научных разработок, представленных на секции, обусловлена ролью и значимостью выработки правильных научно-методических подходов к организации технологии подготовительных операций обогатительного передела различных видов минерального сырья. Представленные работы направлены на развитие методов исследования рудного сырья, способов обесшламливания получаемых минеральных концентратов, проработку методических рекомендаций для оценки свойств измельченных материалов при выборе оптимальных режимов сепарации. Следует отметить увеличение роли технологической минералогии и возможностей ее методов благодаря внедрению в прикладные исследования в области переработки минерального сырья высокоразрешающих многофункциональных приборов, технологий испытаний, заимствованных из смежных областей и их разумного сочетания с традиционными методами минералогического анализа, эффективных способов разупрочнения минералов в руде с использованием различных энергетических воздействий.

На секции «Флотация, гравитация, магнитная и электромагнитная сепарация» заслушано 35 докладов. Традиционно большая часть докладов посвящена поиску и научному обоснованию новых решений при выборе реагентов и реагентных режимов флотации. Большое внимание ученые уделяют исследованию свойств поверхности материалов, условий протекания процессов на межфазных границах, возможностей совершенствования режимов флотации. Предложены новые, находящиеся на стадии лабораторных или полупромышленных испытаний технологические решения при переработке апатитовых, редкометалльных, медно-никелевых, медно-порфировых, калийных и др. руд для извлечения ценных компонентов (в том числе стратегических металлов). Представлены результаты исследований новых реагентов и реагентных режимов для флотационного обогащения медно-никелевых, медно-цинковых, золотосодержащих руд и хвостов обогащения руд цветных металлов. Предложены новые реагенты с комплексобразующими группировками класса азотсодержащих произ-

водных моно- и дикарбоновых кислот, алкилтиокарбаматов, модифицированного поливинилкапролактама. Представлены результаты промышленной апробации исследований по замене реагентов флокулянтов шламовой флотации при обогащении калийных руд.

Большой интерес вызвал доклад представителя фирмы-производителя флотационных реагентов. Развитие отечественной химической промышленности и расширение рынка российских реагентов является на сегодняшний день актуальной задачей. Ряд докладов посвящен повышению эффективности переработки алмазосодержащих руд, обоснованы пути выбора составов и режимов люминофорсодержащих реагентов для модификации спектральных характеристик алмазов. Были рассмотрены вопросы получения железосодержащих концентратов как за счет разработки новых конструкций магнито-гравитационного сепаратора, так и использования процессов высокоградиентной магнитной сепарации. Достаточно широко представлены доклады по результатам гравитационного обогащения минерального сырья различного состава: особенности применения тяжелосредной сепарации при переработке сподуменовых руд, использование шламовых винтовых сепараторов при обогащении тонкоизмельченных сульфидных золотосодержащих руд и др. Уделено внимание разработке способов контроля и управления технологическими процессами обогащения полезных ископаемых, в том числе с использованием цифровых технологий: представлен доклад по результатам разработки программного комплекса для систематизации и анализа результатов исследований обогатимости железных руд.

На секции «Комплексная переработка минерального сырья, гидрометаллургические процессы» представлено 20 докладов. Работы посвящены вопросам расширения минерально-сырьевой базы за счет вовлечения в переработку труднообогатимых руд, промпродуктов и концентратов на основе применения комбинированных технологий, внедрения в технологические схемы специальных процессов и методов, включающих гидрометаллургическую переработку руд и концентратов, изыскание альтернативных источников сырья и технологий.

Существенная часть докладов касалась переработки комплексных руд. Следует особо отметить доклады, рассматривающие следующие инновационные технологии и установки: опытно-промышленную установку для гидро- и электрохлоринации; переработку золотосодержащего сырья тиосульфатными растворителями: процессы органоимодификации сапонитов для получения эффективных сорбентов благородных металлов. А также производство перспективных материалов для критических технологий: режимы выщелачивания эвдиалитового концентрата. Особенность предлагаемых комбинированных технологий — это получение не только концентратов, но и продуктов глубокой переработки (металлы, оксиды металлов и другие химические соединения), например переработка сульфидных медных концентратов сульфатизирующего обжига. Представляют научный и практический интерес доклады по переработке упорных концентратов и техногенного сырья, такого как медные, титано-магнетитовые шлаки с получением товарной продукции, в том числе продукции дефицитных стратегических металлов: извлечение ванадия из титано-магнетитового сырья. Интерес у участников конференции вызвал обзорный доклад о возможностях применения водорода в технологиях обогащения и металлургии железосодержащего сырья.

Представленные на секции работы были посвящены расширению минерально-сырьевой базы за счет вовлечения в переработку труднообогатимых руд и техногенного сырья на основе комбинированных технологий с использованием электрохимических и ультразвуковых воздействий, полимерных сорбентов редкоземельных металлов с применением магнитного гидроциклона, растворов лимонной кислоты, альтернативных методов кучного выщелачивания и биоокисления, процессов сульфатизирующего обжига, экстракции с применением высокомолекулярных алифатических спиртов, азотнокислого выщелачивания, применения поверхностно-активных веществ. Большой интерес вызвал доклад по научному обоснованию связи благородных металлов с органическим веществом соляных пород и углеродистых сланцев.

На секции «Экологические и экономические аспекты процессов переработки техногенного сырья» заслушано 26 докладов. Рассмотрен широкий спектр проблем, связанных с деятельностью горно-обогатительных предприятий, с точки зрения мониторинга, предупреждения, возникновения и снижения экологических и экономических рисков, определяющих условия развития этих предприятий и территорий, на которых они расположены.

Представленные доклады отличает глубокая научная проработка, что свидетельствует об актуальности решаемых задач, и использование методик и инструментария исследований, отвечающих высоким современным требованиям. Экспериментальные результаты, научные разработки и предлагаемые технологии представляют несомненный интерес и будут востребованы в реальном секторе экономики.

На заключительном заседании конференции было проведено заседание в расширенном составе Научного совета РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых и после обсуждения утверждены приоритетные направления по комплексной и глубокой переработке минерального сырья остродефицитных металлов.

Конференция отмечает важность результатов научно-исследовательских работ, представленных в докладах. Практические результаты и предлагаемые технологии представляют несомненный интерес и будут востребованы в реальном секторе экономики.

Значительная часть докладов была представлена молодыми учеными, что подтверждает преемственность и высокий уровень научных школ в области обогащения полезных ископаемых. По результатам конкурса в рамках проведения Плаксинских чтений — 2024 за наиболее интересные теоретические и экспериментальные результаты в области переработки минерального сырья шесть молодых ученых награждены дипломами и памятными подарками.

Конференция проходит в непростое для России время, когда от представителей науки, производства, бизнеса зависит будущее страны, ее экономическое развитие, пополнение материальной базы и в конечном итоге благополучие людей.

По содержанию работа конференции является отражением задач, решение которых предусмотрено утвержденной Правительством России «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года» (распоряжение от 11 июля 2024 года № 1838-р), направленных на устойчивое долгосрочное обеспечение национальной экономики минеральным сырьем.



Награждение молодых участников конференции

В соответствии с поручением президента РФ В. В. Путина № ПР-1130 от 28 июня 2022 года, постановлением Правительства и постановлением Президиума РАН от 11 апреля 2023 года № 70 по развитию минерально-сырьевой базы в остродефицитных металлах для высокотехнологической промышленности конференция считает целесообразным:

- объединить исследования ведущих организаций РАН, отраслевых институтов, вузов, инжиниринговых компаний по разработке экологически безопасных технологий извлечения стратегических металлов из комплексных руд сложного вещественного состава, выделения ценного сырья из гидроминеральных и техногенных источников;
- разработать и обеспечить промышленное производство высокоэффективных отечественных флотореагентов, экстрагентов и сорбентов для их применения в технологиях обогащения и селективного извлечения редких, редкоземельных и критических металлов;
- особое внимание уделить развитию синтеза, производства и применения отечественных реагентов различных классов, в том числе с комплексобразующими группировками класса азотсодержащих производных моно- и дикарбоновых кислот, алкилтиокарбаматов при обогащении редких и стратегических металлов, модифицированного поливинилкапролактама, а также флокулянтов и коагулянтов;
- обеспечить создание нового отечественного оборудования для предконцентрации дезинтеграции и обогащения (дробилки ударного действия, тяжелосредные сепараторы, флотационные машины и др.);
- разработать достоверные методы анализа и экспресс-анализа нетрадиционных форм нахождения редких, редкоземельных и критических металлов и современные методики *in situ* изучения процессов сорбции реагентов, структурно-химических преобразований минералов в условиях физико-химических методов извлечения, растворения и экстракции ценных компонентов;
- обратиться к Минпромторгу с предложением организации работы по аналитическому исследованию потребности России в редких и редкоземельных металлах, прогнозу их производства и разработке программы развития отечественного производства РЗМ (производство, предприятие, технологии, потребители, обеспечение оборудованием, реагентами и т. д.);
- рассматривать эффективность переработки и монетизацию горнопромышленных отходов как фактор устойчивого развития горно-металлургических компаний и снижения экологических рисков;
- усилить координацию и консолидацию исследований по разработке технологических процессов комплексного промышленного использования гидроминерального сырья для извлечения ценных компонентов;
- расширить применение методов моделирования и искусственного интеллекта для совершенствования технологии обогащения, а также оценки запасов редких металлов в рудном и техногенном сырье;
- интенсифицировать исследования по природосберегающим технологиям использования уникальных минеральных ресурсов Арктической зоны Российской Федерации;
- считать необходимым развивать научные и прикладные исследования в области горной экологии при переработке рудного и техногенного сырья, в том числе по заказам предприятий;
- возобновить работу конгресса обогатителей стран СНГ с новым названием «Московский Международный конгресс» и проводить его раз в два года;
- провести в 2025 году Международную конференцию (Плаксинские чтения) «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» на площадке ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Работа Международной конференции «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» (Плаксинские чтения — 202) освещалась в средствах массовой информации (онлайн-ресурс ГоИ КНЦ РАН и ФИЦ КНЦ РАН).

Материалы конференции опубликованы в сборнике «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» (Плаксинские чтения — 2024), г. Апатиты, 23–27 сентября 2024 г.: материалы Международной конференции. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 565 с., ISBN 978-5-91137-523-2; DOI: 10.37614/978-5-91137-523-2, постатейно размещаются на сайте научной электронной библиотеки (elibrary.ru), интегрированной с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ), электронная версия доступна на сайте «Плаксинских чтений» и ГоИ КНЦ РАН.

Участники конференции выражают признательность группе компаний «ТОМС», группе компаний «Эвобласт», ООО «Флотент Кемикалс», ПАО «ФосАгро», ПАО «Акрон», ПАО «Северсталь», ПАО «ГМК Норильский Никель», Госкорпорации «Росатом», АО МХК «ЕвроХим», АО «Аркминерал-Ресурс» за финансовую поддержку в организации международной конференции, издательскому дому «Руда и Металлы» и журналу «Маркшейдерия и недропользование» — информационным партнерам Плаксинских чтений — 2024 и благодарят Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН» и Горный институт — обособленное подразделение ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» за проведение конференции «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» на высоком научно-техническом уровне.



Экскурсия на Ловозёрский ГОК (ГК «Росатом»)

ВЯЧЕСЛАВУ НИКОЛАЕВИЧУ КАЛМЫКОВУ – 85 ЛЕТ



21 октября 2024 года исполнилось 85 лет **Вячеславу Николаевичу Калмыкову** — высококвалифицированному специалисту в области комбинированных технологий освоения месторождений полезных ископаемых профессору кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, доктору технических наук.

Родился Вячеслав Николаевич в п. Чистое Дмитриевского района Курской области. Окончив школу, пошёл обучаться в техническое училище по специальности машинист сложных дорожных машин, работал машинистом бульдозера в тресте «Магнитострой».

В 1964 году окончил с отличием Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И. Носова по специальности «Разработка месторождений полезных ископаемых». До 1968 года работал в управлении буровзрывных работ г. Миасса Челябинской области. С 1968 года весь дальнейший жизненный и трудовой путь Вячеслава Николаевича связан с МГТУ им. Г.И. Носова. Начиная с должности старшего инженера НИСа, затем поступил в аспирантуру.

В 1972 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование устойчивости искусственной потолочины при разработке крутопадающих месторождений камерными системами» и был переведен в штат института на должность ассистента кафедры подземной разработки месторождений полезных ископаемых, с выполнением обязанностей начальника объединенной отраслевой лаборатории сейсмики и далее — доцент, профессор.

В феврале 1993 года Вячеслав Николаевич становится заведующим кафедрой подземной разработки месторождений полезных ископаемых и бессменно руководит ею по сентябрь 2015 года. Он продолжил развивать научные направления, созданные профессорами П. Э. Зурковым и М. Н. Цыгаловым. В 1995 году в Институте проблем комплексного освоения недр Российской Академии наук (г. Москва) Калмыковым В. Н. защищена докторская диссертация на тему «Обоснование параметров выемки запасов прикарьерных зон системами разработки с закладкой».

В. Н. Калмыков участвовал в разработке концепции развития сырьевой базы ПАО «ММК», в проектировании рудников на месторождениях Малый Куйбас и Подотвальное. Им осуществлен большой объем научных исследований и проектных работ, которые использовались в проектировании, строительстве и эксплуатации месторождений ОАО «ЮГК» и рудников Урала: Учалинского, Сибайского, Гайского, Подольского, Молодежного, Межозерного, Кыштымского.

В июле 1996 года В.Н. Калмыков был избран деканом факультета горных технологий и транспорта и работал в этой должности 10 лет.

В январе 2021 г. был создан диссертационный совет Д 212.111.02 и Вячеслав Николаевич стал заместителем председателя совета, а в 2005 году его председателем и возглавлял работу совета до июня 2014 года. Под руководством В. Н. Калмыкова защищено 25 кандидатских диссертаций. В. Н. Калмыков автор и соавтор более 300 научных трудов, включая монографии и авторские свидетельства на изобретения. Его основные научные труды и публикации последних лет преимущественно связаны с разработкой научных основ стратегии более полного освоения недр с вовлечением малоэффективных рудных месторождений и извлечением приконтурных запасов при комбинированном способе разработки; созданием ресурсосберегающих экологически безопасных технологий добычи полезных ископаемых с использованием инертных заполнителей для закладки выработанного пространства и возведения усиленной комбинированной крепи на подземных рудниках.

С 2001 года под руководством Вячеслава Николаевича на базе МГТУ им. Г.И. Носова при поддержке ИПКОН РАН и Министерства промышленности, новых технологий и природных ресурсов Челябинской области проводится международная научно-техническая конференция «Комбинированная геотехнология», которая является платформой для обсуждения актуальных проблем в области комплексного освоения природных и техногенных георесурсов. География участников конференции от Казахстана и Киргизии до США и Чили.

За плодотворную научную и педагогическую деятельность Калмыков В. Н. награжден Премией Губернатора Челябинской области (2002 г.), нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» (2001 г.). Он является Лауреатом Премии Правительства Российской Федерации 2002 года в области науки и техники, награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» - 2 степени (2004 г.).

В настоящее время это признанный ученый в области теории и технологии разработки ценных руд системами разработки с закладкой, один из создателей нового научного направления по комбинированной разработке крутопадающих месторождений.

Коллеги, друзья, ученики, редколлегия и редакция журнала «Маркшейдерия и недропользование» сердечно поздравляют Вячеслава Николаевича Калмыкова со славным юбилеем, желают ему крепкого здоровья, благополучия и долголетия!

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ РАЙОНИРОВАНИЯ В КАРЬЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ И СОРТОВ РУД

В. Л. Яковлев, В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Приведены результаты разработанной методики оценки качественных показателей полезных ископаемых на основе технологий блочного моделирования с использованием современных горно-геологических информационных систем. Предложена блок-схема моделирования качественных показателей полезного ископаемого и приведены результаты ее использования на примере Гусевогорского месторождения титаномagnetитов и Серовского месторождения комплексных руд. Представленная методика позволяет с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд, что способствует решению задач проектирования, планирования и управления производством в условиях экономической неопределенности, ухудшающихся горно-геологических и горно-технологических условий разработки месторождений. На основе компьютерного моделирования получена взаимосвязь технологических решений по отработке месторождений открытым способом и этапов моделирования. Подтверждена универсальность предложенной методики блочного моделирования качества ПИ, которая может быть использована на любом месторождении для решения конкретных горнотехнических задач. Полученные результаты служат основой для разработки методов управления качеством минерального сырья и совершенствования планирования горных работ в режиме управления качеством. Предложенная методика универсальна и позволяет производить оценку качественных показателей полезных ископаемых для выбора рациональных приемов управления качеством минерального сырья.

Ключевые слова: горно-геологическая информационная система, ГГИС, качественные характеристики руд, блочное моделирование, геометризация, геологическая база данных

Благодарность: Авторы выражают особую признательность и большую благодарность коллегам из лаборатории управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН, а также коллективу редакции «Маркшейдерия и недропользование» за поддержку и помощь в написании и оформлении статьи. Работа выполнена в рамках НИР Тема 1 «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1

Для цитирования: Яковлев В. Л., Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С. Методика оценки геологических баз данных с целью районирования в карьере технологических типов и сортов руд *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 12-20. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_12_20.

METHODOLOGY FOR EVALUATING GEOLOGICAL DATABASES FOR THE PURPOSE OF ZONING TECHNOLOGICAL TYPES AND GRADES OF ORES IN OPEN-PITS

V. L. Yakovlev, V. D. Kantemirov, A. M. Yakovlev, R. S. Titov
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract: The article presents the provisions of the developed methodology for assessing the quality indicators of minerals based on block modeling technologies using modern mining and geological information systems (GGIS). A flowchart for modeling the qualitative indicators of a mineral is proposed and the results of its use are presented on the example of the Gusevogorsky deposit of titanomagnetites and the Serov deposit of complex ores. The presented methodology allows us to zone technological types and grades of ores with high reliability in the quarry space, which contributes to solving the problems of design, planning and production management in conditions of economic uncertainty, deteriorating mining and geological and mining-technological conditions of field development. Based on the analysis of computer modeling techniques, a flowchart has been developed showing the relationship between technological solutions for open-pit mining and modeling stages. The article uses examples to confirm the universality of the proposed method of block modeling of the quality of PI, which can be used at any field to solve specific mining problems. The presented scientific results serve as a basis for

the development of methods for managing the quality of mineral raw materials and improving the planning of mining operations in the quality management mode. The proposed methodology is universal and allows for the assessment of the quality indicators of minerals for the selection of rational methods of quality management of mineral raw materials.

Keywords: mining and geological information system, GIS, qualitative characteristics of ores, block modeling, geometrization, geological database

Gratitude: The authors express special gratitude and great gratitude to their colleagues from the Laboratory of Mineral Raw Materials Quality Management of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as to the editorial staff of «Surveying and Subsoil Use», for their support and assistance in writing and formatting the article. Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №.1021062010531-8-1.5.1.

For citation: Yakovlev V. L., Kantemirov V. D., Yakovlev A. M., Titov R. S. Methodology for evaluating geological databases for the purpose of zoning technological types and grades of ores in open-pits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):12-20. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_12_20.

Введение

Эффективность освоения месторождений минерального сырья во многом связана с достоверностью геологической информации о параметрах залегания рудных тел с учетом природной изменчивости качества запасов полезных ископаемых (ПИ). Большинство рудных месторождений залегают в сложной геологической обстановке в виде линз, жил и пластов переменной мощности. Рудные тела во многих случаях имеют включения пустых пород или некондиционных руд разных размеров и формы, при этом элементы залегания рудных тел меняются в широких пределах. В еще большей степени изменяется качественный состав ПИ.

В связи с этим на современном этапе механизации горных работ при больших скоростях перемещения добычного фронта на глубоких горизонтах карьеров сложноструктурных месторождений и существенной изменчивости физико-геологической среды решающее влияние на эффективность всех процессов добычи и переработки минерального сырья оказывают принятые технологии geometrization рудных тел и их последующей рудоподготовки [1].

Пространственное распределение типов руд и их количественное соотношение формируют стратегию отработки месторождения в режиме управления качеством минерального сырья [2]. Выбор технологий управления качеством сырья перед его подачей на обогащение производится по результатам оценки качественных характеристик ПИ, выделения в рудном массиве природных типов руд, обоснования характеристик технологических типов руд и их районирования в карьерном пространстве.

Выделение типов руд производится по ряду признаков, связанных с их минеральным и химическим составом [3–4].

Природный (геологический) тип руды — руда, обладающая относительно устойчивым минеральным составом, текстурой и структурой, специфическими физическими свойствами, имеющая достаточно четкую пространственную обособленность. Название природного типа руды дается на основе главных рудообразующих минералов.

Природная разновидность руды — руда, выделяемая на основе более мелких признаков: присутствия второстепенных и редких минералов, минералов — носителей полезных и вредных примесей, текстурно-структурных особенностей и др.

Технологический тип руды — руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определенной схеме обогащения. Основное условие выделения технологического типа — возможность его отдельной

добычи и переработки. Технологический тип подразделяется на сорта.

Технологический сорт руды — руда, имеющая общую для данного технологического типа схему переработки, но отличающаяся технологическими показателями переработки (например, степень извлечения ценного компонента, содержание металла в концентрате и др.).

В настоящее время на ряде крупных месторождений руд черных металлов выделяется от 2 до 6 технологических сортов руды. Технологические сорта одного и того же типа, как правило, перерабатываются совместно в определенных соотношениях. Технологический сорт может соответствовать природной разновидности руды в составе природного типа руды.

Большинство технологических типов руд подвергаются многостадийному обогащению перед подачей их на металлургическое производство, при этом ставится задача по максимальному извлечению ценного компонента в концентрат, которая более полно реализуется при отдельной добыче и обогащении выделенных типов и сортов руд [5].

Одним из направлений повышения эффективности рудоподготовки минерального сырья перед его обогащением является широкое внедрение в практику горного производства горно-геологических информационных систем (ГИС), с помощью которых можно с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд [6] и планировать развитие открытых горных работ.

Цель работы: разработка методики оценки геологических баз данных с целью районирования в карьере технологических типов и сортов руд.

Материал и методы исследования

Исходной базой для оценки качественных характеристик руд и их распределения в недрах являются лабораторные исследования керновых проб, полученных при производстве детальной и эксплуатационной разведки месторождений.

Характер распределения и взаимосвязи ценных компонентов в составе руды представлен на примере Северной залежи Гусевогорского месторождения титаномагнетитов. Выполнен корреляционно-регрессионный анализ данных детальной разведки в пределах действующего Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (табл. 1). Анализ геоданных методами статистики позволил уточнить качественные характеристики руды, что в сочетании с другими методами оценки позволило выделить зоны с повышенным и пониженным содержанием железа, титана и ванадия.

Таблица 1 / Table 1

Статистический анализ данных детальной разведки
по Северному карьеру АО «ЕВРАЗ КГОК» /
Statistic analysis of detailed exploration data on the Northern
Open-pit of EVRAZ KGOK

Химический элемент / Chemical element	Среднее значение / Average value, %	Стандартное отклонение / Std	Коэффициент корреляции / Ratio correlations	Уравнение регрессии связи содержания ценных компонентов / Regression equation of the relationship of the contents of valuable components
Fe	14,16	3,34	Fe - Ti = 0,69	Ti = 0,0743 Fe - 0,1094 R2 = 0,487 Fe (14-18 %) ~ Ti < 0,93-1,28 %
Fe(mg)	63,35	3,93	Fe - Fe(mg) = 0,35	—
Ti	0,99	0,36	Ti - V = 0,92	V = 0,1185 Ti - 0,0083 R2 = 0,8468 Ti (0,93-1,28 %) - V (0,1-0,14 %)
V	0,1	0,04	Fe - V = 0,68	V = 0,0092 Fe - 0,0264 R2 = 0,4687 Fe (14 - 18 %) ~ V (0,1-0,13 %)

На основе статистического анализа и обобщения действующих технологических критериев к железорудному сырью Гусевгорского месторождения установлен комплексный показатель обогатимости, который может быть использован для горно-геометрических построений и районирования технологических типов руд (показано на примере Северного карьера, табл. 2).

Для предварительного анализа технологических свойств руды также предлагается использовать метод оценки контрастности содержания ценных компонентов в ПИ.

В общем случае контрастность руды — это степень неравномерности распределения полезного компонента в руде, установленная по определенным ее объемам [7–8]. С геологической точки зрения контрастность отражает природную гетерогенность руд, т. е. изменчивость оруденения по содержанию полезных компонентов, неравномерность их распределения в рудном теле. Контрастность руды изучают как в условиях естественного залегания рудного тела, так и в различных объемах или порциях отбитой руды вплоть до

единичных кусков. Этот метод оценки обогатимости руд применим на любом этапе рудоподготовки и обогащения.

Количественно контрастность характеризуется показателем контрастности M , который представляет собой средневзвешенное относительное отклонение содержания полезного компонента в отдельных кусках, порциях или интервалах опробования от среднего его содержания в руде (классе руды):

$$M = \frac{1}{q_0} \sum_{i=1}^{i=n} |q_i - q_0| m_i, (1)$$

где q_0 — среднее содержание полезного компонента в руде (классе руды);

q_i — то же, но в отдельных кусках, порциях или интервалах опробования, доля каждого из которых от общей массы исследуемой пробы или общей длины интервала опробования составляет m_i ;

n — число кусков, порций или интервалов опробования.

Величина показателя контрастности может изменяться в пределах от 0 до 2.

По показателю контрастности руды можно подразделять на следующие группы:

$M < 0,5$ — неконтрастная;

$M = 0,5-0,7$ — низкоконтрастная;

$M = 0,7-1,1$ — контрастная;

$M = 1,1-1,5$ — высококонтрастная;

$M > 1,5$ — особоконтрастная.

Чем выше показатель контрастности, тем легче и лучше обогащается руда. Если величина M находится в пределах 0,5–0,7, то при благоприятных прочих условиях обогащение дает более высокие результаты. При показателе 0,7–1,2 можно ожидать хороших технологических результатов обогащения. Руды с более высокой контрастностью могут быть отнесены к легкообогатимым.

Метод предварительной оценки качественных характеристик титаномагнетитовой руды с помощью показателя контрастности опробован на примере моделирования распределения контрастности руд в пределах гор. +160 м Северного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК». Исходными для моделирования явились данные детальной разведки. Для построения модели исследуемый массив скважин условно разбит на равные участки-квадраты (с координатами по осям X, Y).

Всего выделено 20 условных квадратов (табл. 3, рис. 1, 2 (см. цветную вклейку на стр. 81) с шагом Π_x и Π_y :

$$\Pi_x = \frac{X_{max} - X_{min}}{5}; (2)$$

Таблица 2 / Table 2

Соотношения между различными типами руд по комплексному показателю обогатимости в пределах гор. +160 м Северного карьера
Ratios between different types of ores according to the complex indicator of enrichment within the mountains. +160 m of the Northern open-pit

№	Комплексный показатель обогатимости / Comprehensive indicator of enrichment	Категория по вкрапленности / Category of inclusiveness	Содержание железа в магнитной фракции / Iron content in the magnetic fraction, %	Распределение по горизонту / Distribution over the horizon		
				%	тыс. м ²	тыс. м ³
1	Легкообогатимые	Крупновкрапленные	>64,4	1,1	14,5	219
2	Нормальнообогатимые	Крупно- или средневкрапленные	62,61–64,4 (или >64,4)	26,3	356,3	5 345
3	Среднеобогатимые	Средневкрапленные	62,61–64,4	25,7	346,7	5 200
4	Труднообогатимые	Мелко-, тонко- и дисперсновкрапленные	<62,6	42,3	572	8 580
5	Средневкрапленные	Средневкрапленные	Нет данных	4,6	61,5	922
Итого				100	1351	20 266

Таблица 3 / Table 3

Средние содержания ценных компонентов в условном квадрате гор. +160 м Северного карьера
Average contents of valuable components in the conditional square of mountains. +160 m of the Northern open-pit

№ по оси (axis) Y	Среднее содержание полезного компонента (химического элемента) в условном квадрате / Average content of a useful component (chemical element) in a conditional square, %											
	1			2			3			4		
	Fe	Ti	V	Fe	Ti	V	Fe	Ti	V	Fe	Ti	V
A							15,8	1,41	0,14	12,6		0,09
B				14,3	1,05	0,10	15,4	1,15	0,12	15,7	1,39	0,14
C	14,6	0,61	0,06	13,2	0,89	0,09	14,6	1,04	0,12			
D	12	1,07	0,12	14,4	1,06	0,12	14,4	0,98	0,11	14,5		0,11
E	12,2		0,09	13,9	1,02	0,11	14,2	0,71	0,07			

$$\Pi_y = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{5}, (3)$$

где X_{max} , X_{min} — крайние отметки координат скважин по оси X;
 Y_{max} , Y_{min} — крайние отметки координат скважин по оси Y.

Условному квадрату присваивается номер в соответствии с принятой системой координат (например, C2). В каждом квадрате рассчитываются следующие характеристики: среднее содержание в руде ценных компонентов железа общего, титана и ванадия; коэффициенты вариации показателей содержания; коэффициенты контрастности содержания ценных компонентов. Результаты расчетов представлены в таблице 3 и на рисунке 1.

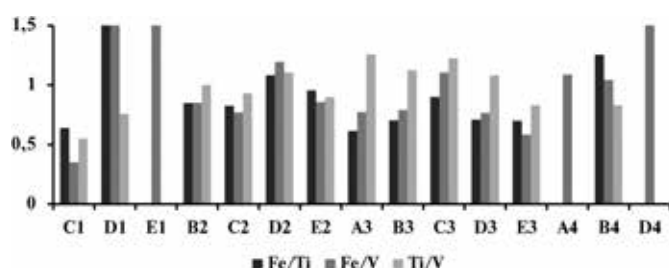


Рис. 1. Показатели контрастности в условных квадратах между представленными в руде ценными компонентами

Fig. 1. Contrast indicators in conditional squares between the valuable components represented in the ore

По результатам исследований отмечается достаточно четко выраженная локализация стабильных по содержанию скважинных проб в северном борту карьера. Установлена высокая колеблемость анализируемых параметров по содержанию ванадия и достаточно однородное содержание железа общего в пределах исследуемого участка карьера. Установлено, что практически по всему исследуемому полю показатели контрастности содержания титана и ванадия в руде выше, чем по железу. В таблице 4 представлено распределение руды по показателю контрастности в пределах гор. +160 м на Северном карьере.

Установлено, что контрастность между элементами в пределах гор. +160 м различается достаточно сильно, так, на западном борту карьера отмечается более высокая контрастность содержания железа, чем титана (в 4 раза). Предполагается, что, отрабатывая северный борт и центральный участок, можно минимизировать колебания качественных показателей ценных компонентов. Следует отметить, что показатель контрастности, характеризующая определенную степень неоднородности руды (класса руды), не может в полной мере свидетельствовать о возможности ее обогащения и не отражает технологические результаты обогащения. Его

использование рекомендуется для предварительного качественного анализа комплексных руд при различных способах ведения горных работ, разных схемах рудоподготовки и предварительного обогащения.

Таблица 4 / Table 4

Распределение руды по показателю контрастности на гор. +160 м
Ore distribution by contrast index at a height of +160 m

Тип руды по показателю контрастности / Type of ore in terms of contrast	Распределение по горизонту / Distribution over the horizon		
	%	тыс. м ²	тыс. м ³
Особоконтрастные (M > 1,5)	13,6	184,1	2 762,2
Высококонтрастные (1,2 < M < 1,5)	24,7	334,4	5 015,3
Контрастные (0,4 < M < 1,2)	33,8	457,1	6 855,4
Неконтрастные (M < 0,4)	26,8	363,1	5 446,2
Отсутствуют данные	1,1	15,1	226,9
Итого	100	1351	20 266

Результаты оценки контрастности химических и текстурно-структурных свойств рудного сырья могут стать основой для обоснования выбора технологических схем рудоподготовки в карьере (усреднение, сортировка, селективная отработка, предобогащение и т. п.) [9]. На рисунке 2 представлены результаты районирования технологических типов руд в пределах гор. +160 м Северного карьера по разным методикам: комплексному показателю обогатимости (содержанию железа в магнитной фракции проб и размера вкрапленности) и показателю контрастности.

Анализ прогноза распределения в карьере различных типов руд, выполненного по представленным методикам оценки, свидетельствует о достаточно похожих результатах районирования. Так, районом основного сосредоточения труднообогатимых руд, по другому методу — неконтрастных, являются северный и западный борта карьера. Легко- и нормальнообогатимые руды, как и выделенные по другой методике, — особо- и высококонтрастные, соответственно, расположены в основном в центральной части карьера.

Установленные на гор. +160 м суммарные объемы легко-, нормально- и среднеобогатимых руд (14,6 млн м³) примерно соответствуют выделенным по методике оценки контрастности суммарным объемам особо-, высоко- и контрастным рудам на горизонте (10,8 млн м³), разница составляет примерно 30 %.

Полученные результаты позволяют предварительно погоризонтно оценить в карьере степень изменчивости полезных компонентов в руде и сделать прогноз распределения определенных типов руд с целью последующего более детального выделения технологических типов руд для задач планирова-

ния горных работ и управления качеством минерального сырья и повышения эффективности обогащения [10–11].

На следующей стадии оценки качества рудного сырья в карьерах производится геометризации типов и сортов руд, при этом используется моделирование горно-геологических объектов и анализ запасов месторождений рудных ПИ на основе распространенных в РФ программных продуктов (MINEFRAME, SURPAC, DATAMINE и др.). С помощью этих систем создается геометрическая модель месторождения, которая служит основой для решения многих задач: подсчета запасов, проектирования предприятия, планирования горных работ, обоснования кондиций ПИ, нормирования потерь ПИ, комплексного использования недр, выбора технологического оборудования и др. Моделирование пространственного распределения качества ПИ месторождения производится на основе технологии блочного моделирования. Блочное моделирование заключается в разделении изучаемого геологического объекта месторождения (залежь, рудное тело, блок подсчета запасов и т. п.) на элементарные геометрические единицы – блоки. Основной задачей блочного моделирования является количественно-качественная оценка массива недр на основании математических методов: статистики, теории вероятности и теории случайных функций [12–15].

Для автоматизации процессов планирования горных работ в режиме управления качеством минерального сырья разработана методика создания блочных моделей месторождений ПИ (рис. 3).

Разработка блочной модели месторождения (участка, рудного тела и т. п.) производится по этапам.

Первым этапом создания блочной модели является сбор и подготовка исходных данных – колонок опробования скважин детальной и эксплуатационной разведки, оценка геологических разрезов и планов.

Второй этап создания блочной модели. Таблицы трансформируют в шаблонную форму, учитывающую структуру

данных выбранной горно-геологической информационной системы. В них содержится информация об изменении по каждой скважине различных свойств полезного ископаемого и пустой породы, данные об инклинометрии, о глубинах и координатах устьев скважин, принадлежности скважин к разведочным профилям и стадиям разведки. Все эти параметры являются основными для создания геологической базы данных по заданному месторождению или его участку.

Третий этап создания блочной модели. Композитирование проб – приведение всех проб по скважинам к равному интервалу (шагу) опробования.

Выполняется первичная статистическая обработка по всему массиву проб:

- по каждому рудному телу;
- каждому типу руды;
- каждому виду опробования.

Полученные данные позволяют определить тип распределения минерализации (нормальные, логнормальное и т. п.) и неоднородность массива данных, которое может быть связано с несколькими генерациями минерализации полезного компонента. Корреляционный анализ позволяет предварительно выявить экстремальные значения проб, не укладывающиеся в общую линию регрессии. На этом этапе возможно применить и другие виды многомерного статистического анализа.

Четвертый этап создания блочной модели. После композитирования производится построение каркасных и блочных моделей, задаются размеры блоков, определяются пространственные границы.

Пятый этап создания блочной модели. Интерполяция и экстраполяция оцениваемых качественных характеристик (содержание ценных компонентов ПИ и др.) методами геостатистики.

Шестой этап создания блочной модели. На основании анализа полученной информации делаются выводы о степени



Рис. 3. Блок-схема методики построения блочной модели месторождения
Fig. 3. Block diagram of the methodology for constructing a block model of the deposit

неоднородности месторождения, обосновывается необходимость их деления на участки однородного строения (домены). Домены выделяются с учетом густоты разведочной сети, морфологических характеристик рудных тел или их отдельных частей, природных типов и промышленных сортов руд, изменчивости оруденения и геостатистических критериев — резкого изменения градиента моделируемых характеристик месторождения. В пределах доменов строятся каркасы рудных тел.

Основной инструмент геостатистики — *вариограмма* (график, функция), используется для определения пространственной корреляции между произвольно размещенными реальными данными наблюдений.

Седьмой этап создания блочной модели. Обоснование размеров блоков (ячеек) для месторождений всех морфологических типов должно выполняться с учетом нескольких факторов: плотности разведочной сети, характеристики геологической структуры месторождения, сложности конфигурации границ рудных тел, пространственной изменчивости содержания полезных компонентов и параметров системы отработки месторождения. Форма блока должна соответствовать структуре моделируемого месторождения и характеру его анизотропии. Размер основных ячеек не должен быть меньше половины среднего расстояния между пробам в направлении разведочного профиля.

Адекватность блочной модели зависит от качества и полноты исходных материалов. Чем больше информации будет введено в базу данных (БД) для создания блочной модели (БМ), тем достовернее будет эта БМ. При этом качество исходных материалов проверяется по всем основным стадиям и видам работ начиная от методики проведения разведочных работ, топографо-геодезических работ, опробования и химико-аналитических работ.

На основе полученных моделей месторождения или его части производится геометризация качественных параметров ПИ с нанесением на плане горных работ изолиний, показывающих содержание ценного компонента в руде, с последующим выделением и оконтуриванием в карьерном пространстве рудных зон одинакового качества.

Для интерпретации геоданных в ГГИС предлагается два основных метода: экспресс и детальный. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого.

На рисунке 4 (см. цветную вклейку на стр. 81) представлена блок-схема выбора метода моделирования и интерпретации геоданных.

Выбор метода зависит от объема геоданных в сформированной базе, решаемых задач и сроков их выполнения. Рекомендуется при сравнительно небольшом объеме геоданных (блок, уступ, участок карьера) использовать экспресс-метод на основе метода обратных расстояний (детерминистический способ), при большом объеме исходных данных предлагается использовать детальный метод блочного моделирования на основе методов геостатистики (кригингас линейной вариограммой).

Достоинства методов геоинформационного моделирования:

- экспресс-метод позволяет оперативно (в полуавтоматическом режиме при непосредственном контроле оператора) получать представления об основных закономерностях пространственного размещения компонентов полезного ископае-

мого при минимальном количестве вычислительных операций;

- детальный метод позволяет в автоматическом режиме производить подсчет запасов на ПК ЭВМ, выделять технологические типы и сорта руд, минимизировать затраты времени на представление результатов, производить моделирование параметров системы разработки, оценить календарный план.

Недостатки методов геоинформационного моделирования:

- экспресс-метод при изменениях исходных данных и требований к кондициям руд или критериям принадлежности руды к определенному технологическому сорту (содержание полезных и вредных компонентов и др.) предполагает трудоемкую ручную обработку изменившихся границ (параметров) зон районирования, а комплексный показатель качества потребует дополнительных расчетов на стадии корректировки геологической базы;

- детальный метод более трудоемкий, так как при его применении необходимо производить большой объем дополнительных исследований и вычислений (геостатистика, создание каркасных моделей, интерполяция в блочную модель и т.п.), а первоначальные затраты времени превышают по сравнению с экспресс-методом в 5–10 раз.

Результатом обоих методов является модель распределения в карьерном пространстве качественных показателей технологических типов руд. Следовательно, оба метода имеют свои области применения в зависимости от постановки задачи и сроков её выполнения и при необходимости могут дополнять друг друга.

С использованием предложенных методов в качестве примера выполнена оценка распределения качественных параметров руд для ряда месторождений.

Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения титаномагнетитов. На рисунках 5, 6 (см. цветную вклейку на стр. 82) представлены схемы районирования в карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» технологических типов руд по содержанию TiO_2 .

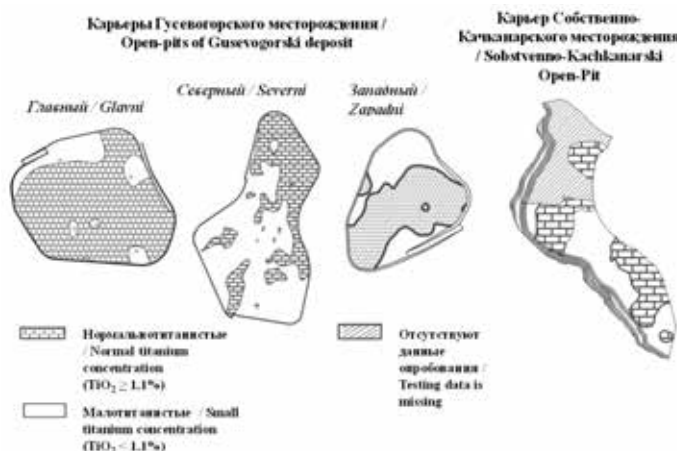


Рис. 5. Распределение в карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» технологических типов руд по содержанию TiO_2

Fig. 5. Distribution of technological types of ores in the open-pits of EVRAZ KGOK by TiO_2 content

Комплексные исследования руд Гусевогорского месторождения показали, что малотитанистая их разновидность по сравнению с нормальнотитанистой имеет более высокую обогатимость и измельчаемость и меньшую магнитную

жесткость. Учитывая большие различия в обогатимости и измеляемости малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей этих руд, целесообразно их выделить в разные технологические типы. Таким образом, выделение технологических типов руд по содержанию TiO_2 имеет существенное значение при их переработке.

Серовское месторождение комплексных руд. Месторождение расположено на восточном склоне Северного Урала.

По результатам геологических исследований на месторождении выявлено два природных типа руд:

- бобово-конгломератовые железные руды, составляющие основной объем месторождения;
- силикатные латеритные никелевые руды.

На основании данных о химическом составе руд выделено три технологических типа (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

**Химический состав основных ценных компонентов
бобово-конгломератовых руд
Chemical composition of the main valuable components
of bean-conglomerate ores**

Компонент / Components	Технологические типы руд / Technological types of ores			Средний состав бобово-конгломератовой руды в % соотношении разновидностей / Average composition of bean-conglomerate ore in % ratio of varieties: I – 20, II – 45, III – 35.
	1	2	3	
	Руда бобово-конгломератова плотная / Bean-conglomerate dense ore (I)	Руда бобово-конгломератова рыхлая / Bean-conglomerate loose ore (II)	Руда охристая и охристая / Ore is ochreous and ochreous-clay (III)	
Feобщ, %	46,99	36,35	42,79	40,73
Cr ₂ O ₃ , %	2,92	2,51	2,92	2,75
Ni, %	0,11	0,35	0,22	0,21
Co, %	0,038	0,048	0,041	0,042

Результаты моделирования распределения выделенных руд на гор. +40 м перспективного карьера Серовского месторождения представлены на рисунке 7 (см. цветную вклейку на стр. 82). Таким образом, по геологическим данным Серовского месторождения комплексных руд выполнен анализ горно-геологических условий, статистический регрессионный анализ качественных показателей руд, построены геоинформационные модели, на основании которых выделены и районированы 2 природных и 3 технологических типа руд.

Результаты моделирования позволят разработать стратегию освоения комплексного месторождения.

Заключение

Экспериментально-аналитические исследования позволили сформулировать основные положения методики моде-

лирования качественных характеристик ПИ, геометризации в карьерном пространстве природных и технологических типов и сортов рудного сырья.

Усовершенствованы методы блочного моделирования качественных показателей руд в режиме управления качеством сырья.

Разработана методика геометризации качественных показателей ПИ в карьере (в плане и по глубине). Основа методики заключается в создании блочной модели геологического объекта и интерпретации полученных данных программными средствами ГГИС. Результаты геометризации способствуют выявлению сортовых закономерностей в недрах, используемых в процессе планирования горных работ, а также при разработке более эффективной технологии рудо-подготовки на горном предприятии.

Этап подготовки данных для создания блочной модели включает в себя следующие операции: условную классификацию по типу встречаемых петрографических разностей в опробуемых взрывных скважинах; разбиение на петрографические интервалы по глубине скважины; трансформацию подготовленных данных в соответствующий формат.

Этап построения блочной модели состоит из следующих операций: преобразования подготовленных данных в нормализованную геологическую базу данных; анализа соответствующих особенностей моделируемого объекта и определения условий для его моделирования; обоснования и выбора соответствующего метода пространственной интерполяции данных (применен метод «обратных расстояний»); композитирования данных по скважинам с заданным интервалом; создания блочной модели.

Разработанный метод оценки изменчивости блочной модели по различным пространственным направлениям позволяет рассмотреть множество вариантов развития открытых горных работ.

С использованием разработанных усовершенствованных блочных моделей распределения качественных показателей руд установлена зональность размещения руд на карьерах ОАО «ЕВРАЗ КГОК», а также перспективного для освоения Серовского месторождения комплексных руд.

Выводы

1. Разработаны основные методологические подходы к выделению по качественным признакам и районированию в карьерном пространстве технологических типов и сортов руд на основе геометризации и компьютерного блочного моделирования.

2. Разработанные усовершенствованные методы блочного моделирования качественных показателей рудного сырья и геометризации в карьерном пространстве технологических типов руд позволяют повысить эффективность планирования развития горных работ и обогащения сырья с целью максимального извлечения ценных компонентов и получения высококачественных концентратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Яковлев ВЛ. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 284 с. [Yakovlev VL. The study of transients – a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of georesources. Yekaterinburg, 2019 (In Russ.).]

2. Яковлев ВЛ, Корнилов СВ, Соколов ИВ. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья; под ред. член-корр. РАН В. Л. Яковлева. Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 360 с. [Yakovlev VL, Kornilov SV, Sokolov IV. The innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources. Yekaterinburg, 2018 (In Russ.).]
3. Яковский ПП. Горно-геологические условия при оценке месторождений. М.: МГГА, 2001. 37 с. [Yaskovsky PP. Mining and geological conditions in the assessment of deposits. Moscow, 2001.]
4. Смирнов ВИ. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1982. 672 с. [Smirnov VI. Geology of minerals. Moscow, 1982 (In Russ.).]
5. Корнилов СВ, Дмитриев АН, Пелевин АЕ, Яковлев АМ. Раздельная переработка руд Гусевогорского месторождения. *Горный журнал*. 2016;(5):86–89. [Kornilov SV, Dmitriev AN, Pelevin AE, et al. Separate processing of ore from the Gusevogorsky deposit. *Mining Journal*. 2016;5:86-9 (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.05.12.]
6. Кантемиров ВД, Титов РС, Яковлев АМ. Примеры технических решений по снижению горно-геологических рисков при отработке сложноструктурных месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022;4(120):19–32. [Kantemirov VD, Titov RS, Yakovlev. Examples of technical solutions to reduce mining and geological risks during the development of complex-structured deposits. *Surveying and Subsoil Use*. 2022;4(120):19-32 (In Russ.).]
7. Пухальский ЛЧ. Теория контрастности урановых руд. М.: Госатомиздат, 1963. 176 с. [Puhalsky LCh. The theory of contrast of uranium ores. Moscow, 1963 (In Russ.).]
8. Мокроусов ВА. Контрастность руд, ее определение и использование при оценке обогатимости. *Минеральное сырье*. 1960;(1):70–75. [Mokrousov VA. Contrast of ores, its definition and use in the assessment of enrichment. *Mineral raw materials*. 1960;1:70-5 (In Russ.).]
9. Ревнивцев ВИ, Азбель ВИ, Баранов ЕГ. [и др.]. Подготовка минерального сырья к обогащению. М.: Недра, 1987. 307 с. [Revnitstev VI, Azbel VI, Baranov EG, et al. Preparation of mineral raw materials for enrichment. Moscow, 1987 (In Russ.).]
10. Noriega R, Pourrahimian Y. A systematic review of artificial intelligence and data-driven approaches in strategic open-pit mine planning. *Resour. Policy*. 2022;77:102727. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102727.
11. Blom M, Pearce AR, Stuckey PJ. Short-term planning for open pit mines: A review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019;33(5):318–339. DOI: 10.1080/17480930.2018.1448248
12. Jelvez E, Morales N, Ortiz JM. Stochastic Final Pit Limits: An Efficient Frontier Analysis under Geological Uncertainty in the Open-Pit Mining Industry. *Mathematics*. 2021;10(1):100. DOI: 10.3390/math10010100
13. Monestiez P, Allard D, Froidevaux R. *GeoENV III – Geostatistics for Environmental Applications*. New York: Springer, 2001. 555 p.
14. Демьянов ВВ, Савельева ЕА. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с. [Demyanov VV, Savelyeva EA. Geostatistics: theory and practice. Institute of Problems of Safe Development of Nuclear Energy of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2010 (In Russ.).]
15. Кузнецов ОЛ, Никитин АА, Черемисину ЕН. Геоинформатика и геоинформационные системы. М.: ВНИИГеосистем, 2005. 453 с. [Kuznetsov OL, Nikitin AA, Cheremisin EN. Geoinformatics and geoinformation systems. Moscow, 2005 (In Russ.).]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Яковлев Виктор Леонтьевич –
член-корреспондент РАН, советник РАН, д-р
техн. наук, профессор, Институт горного дела
УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, ORCID 0000-
0001-5860-9626, e-mail: yakovlev@igduran.ru

Viktor L. Yakovlev –
Corresponding Member of the Russian Academy of
Sciences, Adviser of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Mining, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg,
Russian Federation, ORCID 0000-0001-5860-9626,
e-mail: yakovlev@igduran.ru



Кантемиров Валерий Данилович –
канд. техн. наук, заведующий лабораторией
Управления качеством минерального
сырья, Институт горного дела УрО РАН, г.
Екатеринбург, Россия, ORCID 0000-0001-6486-
2740, e-mail: ukrkant@mail.ru

Valery D. Kantemirov –
Cand. Sci. (Eng.), Quality management laboratory
chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russian Federation, ORCID 0000-
0001-6486-2740, e-mail: ukrkant@mail.ru



Титов Роман Сергеевич –
старший научный сотрудник, лаборатория
управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН, г.
Екатеринбург, Россия, ORCID 0000-0002-3569-
2743, e-mail: ukr07@mail.ru

Roman S. Titov –
senior researcher, Quality management laboratory,
Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russian Federation, ORCID
0000-0002-3569-2743,
e-mail: ukr07@mail.ru



Яковлев Андрей Михайлович –
канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
лаборатория Управления качеством
минерального сырья, Институт горного
дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия,
ORCID 0000-0001-8285-6387,
e-mail: quality@igduran.ru

Andrei M. Yakovlev –
Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Quality
management laboratory, Institute of Mining of Ural
branch of RAS, Yekaterinburg, Russian Federation,
ORCID 0000-0001-8285-6387,
e-mail: quality@igduran.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД

В. И. Голик¹, А. С. Выхребенец², Р. И. Миргалиев², К. К. Мулухов², В. Н. Хетагуров²

¹Южно-Российский государственный политехнический университет, г. Новочеркасск, Россия

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТИ), г. Владикавказ, Россия

Аннотация: Целью статьи является детализация концепции гуманизации технологий добычи руд при подземной разработке металлических месторождений. Главной проблемой горного производства стало обращение с отходами переработки, количество которых увеличивается по причине перевода запасов руд в категорию неактивных вследствие выборочной выемки руд из недр. Даны этапы развития горного производства в историческом срезе. Приведены сведения о возможностях традиционных технологий обогащения по раскрытию руд и потерях рудных компонентов в хвостах. Пояснена роль феномена управления состоянием массива в процессе очистной выемки снижении разубоживания руд породами при развитии критических напряжений. Предложен алгоритм управления состоянием массива с использованием геомеханического эффекта. Показано, что объем разубоживающих пород зависит от феномена образования жесткой шарнирной арки из заклинившихся пород. Приведены варианты корректировки состояния массива за счет перекрытий, наклона рудных стенок, создания защитной стены и анкерования пород. Рекомендован вариант разработки с комплексированием технологий на этапах существования. Дана характеристика технологий с выщелачиванием металлов из руд, как основного резерва увеличения минерально-сырьевой базы получения металлов за счет вовлечения в производство некондиционных для традиционных технологий запасов руд. Сделан прогноз условий добычи руд в перспективе. Сделан вывод, что радикальной мерой снижения опасности отходов является использование комбинированных химического обогащения и механической активации при их утилизации.

Ключевые слова: руда, месторождение, отходы, массив, разубоживание, напряжения, геомеханика, выщелачивание

Для цитирования: Направления модернизации технологий подземной добычи руд / В. И. Голик, А. С. Выхребенец, Р. И. Миргалиев [и др.]. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 21-25. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_21_25.

DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF UNDERGROUND ORE MINING TECHNOLOGIES

V. I. Golik¹, A. S. Vyskrebenev², R. I. Mirgaliev², K. K. Mulukhov², V. N. Khetagurov²

¹South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

²North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Abstract: The purpose of the article is to detail the concept of humanization of ore extraction technologies in the underground mining of metal deposits. The main problem of mining has become the handling of processing waste, the amount of which is increasing due to the transfer of ore reserves to the inactive category due to selective extraction of ores from the subsoil. The methodology of the problem research includes experiments, modeling, theoretical analysis and generalization of practice data. The stages of development of mining production in the historical section are given. Information is provided on the possibilities of traditional enrichment technologies for the disclosure of ores and the loss of ore components in tailings. The role of the phenomenon of controlling the state of the massif in the process of purification extraction and reducing the dilution of ores by rocks during the development of critical stresses is explained. An algorithm for controlling the state of the array using the geomechanical effect is proposed. It is shown that the volume of diluting rocks depends on the phenomenon of the formation of a rigid hinge arch from wedged rocks. The options for correcting the state of the massif due to overlaps, inclination of the ore walls, creation of a protective wall and anchoring of rocks are presented. A variant of development with the integration of technologies at the stages of existence is recommended. The characteristic of technologies with the leaching of metals from ores is given, as the main reserve for increasing the mineral resource base for obtaining metals due to the involvement in the production of substandard ore reserves for traditional technologies. A forecast of ore mining conditions in the future has been made. It is concluded that a radical measure to reduce the risk of waste is the use of combined chemical enrichment and mechanical activation during their disposal.

Keywords: ore, deposit, waste, array, dilution, stresses, geomechanics, leaching

For citation: Golik V. I., Vyskrebenev A. S., Mirgaliev R. I., et. al. Directions of modernization of underground ore mining technologies. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):21-25. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_21_25.

Введение

В мире добывается 100 млрд. тонн минерального сырья в год с удвоением объема каждые 10-12 лет.

Главной проблемой человечества стало обращение с отходами переработки количество которых превышает 15 млрд. тонн. Причина увеличения некондиционного сырья в хранилищах – тенденция валовой выемки руд из недр в расчете на прогресс технологий их обогащения.

Использование видов извлекаемых из недр элементов увеличивается со временем. Если в античную эпоху использовали до 20 элементов, то в XVIII веке их было 28, в XIX век – 50, в начале XX века – 60, а в наше время – 90.

От количества добытых за всю историю полезных ископаемых в XX веке добыто, %: нефти 99, угля 90, железной руды 87, медной руды 80, золота 70.

Отличительные черты современного горного производства: масштабность, применение мощной техники и динамичность (табл.1).

Таблица 1 / Table 1

**Вехи развития горного производства /
Milestones in the development of mining production**

40 тыс. лет до н. э.	10 тыс. лет до н.э.	Средние века	18 в.	19 в.	20 в	Будущее
Собирательство	Подземная добыча с использованием камня и рогов оленя, мускульная сила.	Металлические орудия, тепловая энергия, использование животных, примитивная механизация.	Механизация процессов, появление ВВ, паровой и электрический привод	Механизация и автоматизация технологий. Специальные технологии добычи	Модернизация традиционных технологий на основе достижений науки	Технологии с использованием новых видов энергии

Развитые страны с 16 % населения земного шара добывают около 35 %, а потребляют более 55 % минерального сырья. Крупнейшие добытчики: Китай, Бразилия, Россия, Австралия и Канада извлекают из недр 25 видов полезных ископаемых из 30 важнейших.

Хотя цена извлекаемого в России металлического сырья составляет 650 млрд. долл. или 5,5 % добываемого в мире, она еще не гарантирует свою сырьевую безопасность, поскольку экспортирует не рафинированные металлы, а продукцию первого передела руды. Экспортируются железные, свинцовые, вольфрамовые, цинковые и др. руды.

Тенденция увеличения дефицита металлического сырья формирует глобальную проблему обеспечения металлом: за счет пока не используемых резервов в виде хвостов обогащения и некондиционных руд.

Большинство богатых руд извлекается из недр с потерями до 60 %. В ходе металлургического передела извлекаются лишь несколько видов металлов. Хвосты переработки в виде пыли и сажки распределяются между субъектами живого вещества. Горнодобывающая отрасль решает упрощенную проблему добычи конкретного элемента, отправляя остальные в отходы. Критерием себестоимости при этом является прибыль от реализации конкретного металла без учета потерь металлов.

Горные предприятия не располагают технологиями утилизации с доведением хвостов до уровня санитарных требований. Происходит расхищение запасов хвостохранилищ для нужд населения и теневого бизнеса, в результате чего территории формируют статус катастрофической загрязненности химическими продуктами.

Стоимость полезных элементов в хвостах обогащения нередко превышает стоимость извлекаемого титульного металла. Рано или поздно технология комплексного извлечения металлов станет рентабельной, поэтому хвосты обогащения хранятся, в первую очередь, как сырье для будущих поколений.

Комплексная переработка хвостов добычи и переработки руд является актуальной задачей и улучшает экологическую обстановку, но законодательная база многих стран не достаточно строго обязывает производителей приводить районы разработки в прежнее состояние, ограничиваясь наложением штрафов, несопоставимых с величиной действительного ущерба.

В рамках решения этой задачи имеется ряд публикаций отечественных и зарубежных специалистов. Этапам развития горного производства посвящены работы ряда авторов [1-3]. Прогнозные оценки перспектив совершенствования процессов добычи руд приведены в трудах [4-5]. Новые технологии, в том числе, специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых предложены в работах [6-9]. Методы исследования параметров модернизации производственных процессов и способов добычи руд даны в публикациях российских и зарубежных специалистов данного профиля [10-14]. Геомеханические последствия подрработки территорий горных отвалов и новые методы решения трехмерных геоэкологических задач даны в работах [15-17]. Отдельные аспекты задачи рассмотрены в работах [18-20].

Методика

Методология исследования проблемы включает в себя шахтные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение полученных результатов.

Результаты исследований

Традиционные технологии обогащения характеризуются раскрытием руд в пределах от 50 до 80 % с потерей остальных компонентов в хвостах.

На 1 т готового металла приходится 5 тыс. тонн вскрышных пород, 100 т хвостов обогащения и 8 т металлургических шлаков. Под хвостохранилища отводится примерно 0,1 га площади земли на 1000 т сырья. Например, в 14 хвостохранилищах предприятия Висмут на площади 7 км² находилось 160 млн. м³ хвостов. Природное выщелачивание токсичных элементов из хвостов продолжается 100-150 лет. Выбор технологий управления состоянием хранилищ осуществляется решением модели, целевой функцией которой является прибыль, а переменными – соотношением ущерба от хранения отходов и затрат на его предотвращение.

Управление состоянием массива в процессе очистной выемки осуществляется разделением рудовмещающего массива на безопасные участки рудными целиками или искусственными сооружениями из твердеющих закладочных смесей (рис. 1).

Алгоритм управления состоянием массива сводится к уменьшению высоты свода обрушающихся пород:

– массив разделяется на безопасные участки целиками или закладкой;

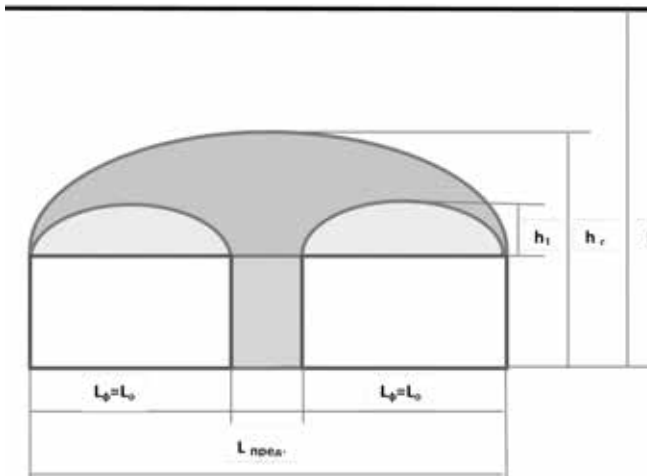


Рис. 1. Схема к разделению массива на геомеханически безопасные пролеты: $L_{\text{пред}}$, $L_{\text{ф}}$, L_0 – соответственно, предельный по условию образования свода естественного равновесия, м; h_1 – высота свода выработки исходная, м; h_2 – высота свода выработки после разделения, м; H – глубина работ, м

Fig. 1. The scheme for dividing the array into geomechanically safe spans: $L_{\text{пред}}$, $L_{\text{ф}}$, L_0 – respectively, the limit according to the condition of formation of the arch of natural equilibrium, m; h_1 – the height of the arch of the initial work, m; h_2 – the height of the arch of the work after separation, m; H – the depth of work, m

- пустоты заполняют или оставляют незаполненными;
- вынимают камеры первой очереди, пустоты заполняют смесями, затем камеры второй очереди.

Геомеханический эффект:

- при выемке камер первой очереди обрушение происходит из свода малой высоты;
- при выемке камер второй очереди давление перераспределяется на массив твердеющей закладки первой очереди и высота свода минимизируется.

Объем разубоживающих пород зависит от образования жесткой шарнирной арки из заклинившихся пород, предотвращающей обрушение пород. При обеспечении условия нижний слой пород заклинивается и обеспечивает плоскую кровлю без обрушения пород.

Уменьшение разубоживания налегающими породами достигается за счет разделяющих или несущих перекрытий из канатов, сегментов дерева, автошин, металла и т.п. (рис. 2).

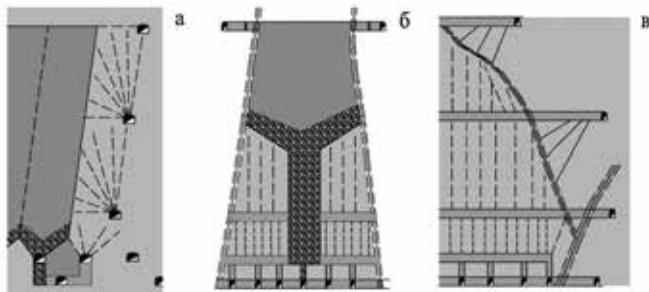


Рис. 2. Методы упрочнения массива: а – наклон стенок камер на руду; б – подача смеси на руду; в – анкерование

Fig. 2. Methods of solidification of the array: a – the inclination of the walls of the chambers to the ore; b – the supply of the mixture to the ore; c – anchoring

Месторождения переживают несколько этапов своего существования. Комплексирование позволяет в рамках предыдущего этапа готовить благоприятные условия для следующего этапа, повышая полноту использования недр и радикальное улучшение экономических показателей (рис. 3).



Рис. 3. Комплексирование этапов разработки

Fig. 3. Integration of development stages

Подземное выщелачивание или избирательный перевод металла в жидкую фазу с последующим извлечением и растворов гидрометаллургическими методами осуществляется в недрах. В качестве выщелачивающих агентов используются кислородсодержащие (серная, азотная, фосфорная, сернистая) и бескислородные (соляная, сероводородная) кислоты, а также растворы солей (соды, сульфида натрия, сульфитов щелочных металлов и др.).

Алгоритм обоснования параметров блокового выщелачивания приведен на (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм обоснования параметров блокового выщелачивания

Fig. 4. The algorithm for substantiating the parameters of block leaching

Заключение

Добыча полезных ископаемых будет характеризоваться масштабностью, применением высокопроизводительной техники, уменьшением содержания металлов, увеличением глубины работ и негативном воздействии горного производства на окружающую среду, особенно за счет химизации продуктами хранения минерального сырья.

Радикальной мерой снижения опасности является минимизация отходов добычи и переработки руд. Наибольшие перспективы открывает использование технологий комбинированного химического обогащения и механической активации.

В решении экологических проблем приоритетны направления: переход на подземный способ добычи руд и переме-

щение отходов горного производства в выработанное пространство после извлечения металлов.

Концепция гуманизации добычи металлов включает в себя компоненты: добыча богатых руд для переработки с минимальными потерями и разубоживанием; извлечение

металлов выщелачиванием из добытых руд с малым содержанием; извлечение металлов из хвостов обогащения и металлургии с механохимической активацией; утилизация вторичных хвостов выщелачивания с использованием активированной мелкой фракции в качестве вяжущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гуриев ГТ, Воробьев АЕ, Голик ВИ. Человек и биосфера: устойчивое развитие. 2-е издание, дополненное и переработанное. Владикавказ: Терек, 2001. 475 с. [Guriev GT, Vorobyov AE, Golik VI. Man and the biosphere: sustainable development. Vladikavkaz, 2001, 475 p. (In Russ.).]
2. Воробьев АЕ, Голик ВИ, Лобанов ДП. Приоритетные пути развития горнодобывающего и перерабатывающего комплекса Северо-Кавказского региона: под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого. Владикавказ: РУХС, 1998. 362 с. [Vorobyov AE, Golik VI, Lobanov DP. Priority ways of development of the mining and processing complex of the North Caucasus region. Vladikavkaz, 1998 (In Russ.).]
3. Валиев НГ, Пропп ВД, Вандышев АМ. Кафедре горного дела УГГУ - 100 лет. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020;(8):130-143. [Valiev NG, Propp VD, Vandyshev AM. The Mining Department of UGSU is 100 years old. Izvestia of higher educational institutions. Mining Journal. 2020;(8):130-43. (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-130-143.]
4. Ключев РВ, Босиков ИИ, Майер АВ, Гаврина ОА. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. Устойчивое развитие горных территорий. 2020;12(2):283-290. [Klyuyev RV, Bosikov II, Mayer V, Gavrina OA. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural and technical system. Sustainable development of mountain territories. 2020;12(2):283-90. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.]
5. Баймишев РН. Эффективные международные подходы в государственном управлении недрами. Горные науки и технологии. 2020;5(2):162-184. [Baymishev RN. Effective international approaches in public subsoil management. Mining sciences and technologies. 2020;5(2):162-184. (In Russ.).]
6. Исмаилов ТТ, Голик ВИ, Дольников ЕБ. Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых. Москва, 2006. 510 с. [Ismailov TT, Golik VI, Dolnikov EB. Special methods of mining mineral deposits. Moscow, 2006, 510 p. (In Russ.).]
7. Хайрутдинов ММ, Конгар-Сюрюн ЧБ, Тюляева ЮС, Хайрутдинов АМ. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020;(331)11:30-36. [Khairutdinov MM, Kongar-Suryun ChB, Tyulyaeva YuS, Khairutdinov A. Cement-free filling mixtures based on water-soluble technogenic waste. Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2020;331(11):30-6. (In Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.]
8. Хайрутдинов АМ, Конгар-Сюрюн ЧБ, Т. Kowalik, Ю. С. Тюляева Управление напряженно-деформационным состоянием массива горных пород путем формирования разнопрочностной закладки. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020(10);42-55. [Khairutdinov AM, Kongar-Suryun ChB, Kovalik T, Tyulyaeva YuS. Management of the stress-strain state of a rock mass by forming a multi-strength bookmark. Mining information and analytical bulletin. 2020;(10);42-55. (In Russ.).]
9. Комашченко ВИ. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015;(4):23-30. [Komashchenko VI. Ecological and economic expediency of utilization of mining waste for the purpose of their processing. Izvestiya Tula State University. Earth Sciences. 2015;(4):23-30. (In Russ.).]
10. Айнбиндер ИИ, Пацкевич ПГ, Красюкова ЕВ. Обоснование параметров опасных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений Якутии. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019;(3):48-60. [Einbinder II, Patskevich PG, Krasnyukova EV. Substantiation of the parameters of hazardous zones in the combined development of kimberlite deposits in Yakutia. Izvestiya Tula State University. Earth Sciences. 2019;(3):48-60. (In Russ.).]
11. Трофимов АВ, Киркин АП, Румянцев АЕ, Яваров АВ. Применение численного моделирования для определения оптимальных параметров метода полной разгрузки керна при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Цветные металлы. 2020;(12):22-27. [Trofimov AV, Kirkin AP, Romyantsev AE, Yavarov AV. Application of numerical modeling to determine the optimal parameters of the method of complete core unloading when evaluating the stress-strain state of a rock mass. Non-ferrous metals. 2020;(12):22-7. (In Russ.). DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03.]
12. Tsinghua Lei, Ke Gao. Numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019;113:121-33. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.12.001.
13. Vanneski K, Mastrorochko G, Salvini R. Assessment of the destruction of a mountain column using change detection analysis and FEM modeling. International Journal of Geoinformatics. 2021;10(11):774. DOI: 10.3390/ijgi10110774.
14. Игнатьева МН, Юрак ВВ, Душин АВ, Стровский ВЕ. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. Горные науки и технологии. 2021;6(2):73-89. [Ignatieva MN, Yurak VV, Dushin AV,

Strovsky VE. Technogenic mineral formations: problems of transition to a circular economy. *Mining sciences and technologies*. 2021;6(2):73-89. (In Russ.)). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>.

15. Качурин НМ, Стась ГВ, Корчагина ТВ, Змеев МВ. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле*. 2017;(1):170-182. [Kachurin NM, Stas GV, Korchagina TV, Zmeev MV. Geomechanical and aerogasodynamic consequences of mining the territories of the mining branches of the mines of Eastern Donbass. *Izvestiya Tula State University. Ser. Earth Sciences*. 2017;(1):170-82. (In Russ.)].

16. Яицкая НА, Бригида ВС. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2022;12(1):162-173. [Yaitskaya NA, Brigida VS. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems: spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022;12(1):162-73. (In Russ.)].

17. Wang Yu, Huang J, Wang G. Numerical analysis of stresses caused by mining and plastic evolution, taking into account influencing factors: high stresses in place, excavation rate and multilayer heterogeneity. *Engineering calculations*. 2022;39(8):2928-57. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2021-0614>.

18. Ahmadfaraj M, Mirmohammadi M, Afzal P, et al. Fractal modeling and comparative analysis of the relationship between structures and mineralization of copper in the Saveh region. *Central Iran. Reviews of ore geology*. 2019;107:172-85. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.026>.

19. Ляшенко ВИ., Коваленко ВН, Голик ВИ, Габараев ОЗ. Бесцементная закладка на горных предприятиях. Москва, 1992. 95 с. [Lyashenko VI, Kovalenko VN, Golik VI, Gabaraev OZ. Cement-free laying at mining enterprises. Moscow, 1992, 95 p. (In Russ.)].

20. Pereira FS, Lima T, Chavez SS, et al. Analysis of free span stability in mine workings with a diameter of more than 10 meters on the example of the Corrego do Sitio mine. *Rock Mechanics for the Development of Natural Resources and Infrastructure*. – Full text of the reports: Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Mining Engineering. Ser. Works on Earth sciences and geology. London : CRC Press, 2020;6:878-83.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Голик Владимир Иванович –

д-р технических наук, профессор, профессор кафедры Горное дело Южно-Российского государственного политехнического университета, г. Новочеркасск Россия

Выскребенец Александр Степанович –

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Технологические машины и оборудование Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ), г. Владикавказ, Россия, e-mail: kafedra-tmo@skgmi-gtu.ru

Миргалиев Ришат Ильшатович –

аспирант, Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Мулухов Казбек Казгериевич –

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Теоретическая и прикладная механика Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ), г. Владикавказ, Россия, e-mail: kafedra-tpm@skgmi-gtu.ru

Хетагуров Валерий Николаевич –

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Технологические машины и оборудование Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ), Владикавказ, Россия, e-mail: hetag@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

В. И. Голик – генерация идеи, анализ результатов и написание текста статьи; А. С. Выскребенец – организация и проведение экспериментов; Р. И. Миргалиев – организация и проведение экспериментов; К. К. Мулухов – систематизация результатов исследований; В. Н. Хетагуров – интерпретация данных анализа / V. I. Golik – idea generation, analysis of results and writing the text of the article; A. S. Vyskrebeneets – organization and conduct of experiments; R. I. Mirgaliev – organization and conduct of experiments; K. K. Mulukhov – systematization of research results; V. N. Khetagurov – interpretation of analysis data

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Golik –

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Mining Department of the South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

Aleksandr S. Vyskrebeneets –

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Technological Machines and Equipment, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation, e-mail: kafedra-tmo@skgmi-gtu.ru

Rishat I. Mirgaliev–

Postgraduate student, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Kazbek K. Mulukhov –

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation, e-mail: kafedra-tpm@skgmi-gtu.ru

Valery N. Khetagurov –

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of technological machinery and equipment, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technical University), Vladikavkaz, Russian Federation, e-mail: hetag@mail.ru

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ

А. А. Кравцов, В. А. Атрушкевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация: В статье выполнен обзор современных исследований, рассматривающих применение гидротехнологии для дегазации угольных пластов, бурении разгрузочных скважин, оборке и других вспомогательных операциях. При дегазации и работах по управлению горным давлением большую роль играют радиальные щели в скважинах, нарезание которых становится возможным при применении специальных насадок, формирующих струи высокого давления. Эксперименты по оборке кровли с использованием гидромониторного исполнительного органа также показали хорошие результаты, и по производительности не уступают традиционным механическим оборочным машинам. Авторы рассмотренных исследований отмечают перспективность гидротехнологии для указанных процессов, а также выделяют ее преимущества, среди которых безопасность, простота и высокая производительность. За счет современных средств автоматизации и роботизации становится возможным создание новых машин и технологий не только для вспомогательных операций, но и для проходки и выемки угля.

Ключевые слова: гидравлическая добыча, гидротехнология, подземная разработка угля, компьютерное моделирование, автоматизация

Благодарность: Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела «Моделирования и управления горнотехническими системами» Института проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова Российской академии наук за консультации и помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Кравцов А. А., Атрушкевич В. А. Обзор современного применения гидротехнологии при добыче угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 26-33. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_26_33.

REVIEW OF MODERN APPLICATION OF HYDRAULIC TECHNOLOGY IN COAL MINING

A. A. Kravtsov, V. A. Atrushkevich

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

Abstract: Article provides review of modern research on hydraulic technology application for coal seam gas drainage, rock stress relief, rock scaling and other supplementary operations. Radial slots in drilled wells play significant role on gas drainage and stress relief process. Cutting such slots is achievable with high-pressure waterjets bits. Experiments on rock scaling shows good results as well, hydraulic machines achieve same level of productivity as mechanical ones. Author of reviewed researches claims perspectives of this technology due to its safety, simplicity and high productivity. Using modern robotic and automation technology it is possible to use hydraulic technology not only for supplementary operations, but for roadheading and coal extraction as well.

Keywords: hydraulic mining, hydraulic technology, underground coal mining, computer simulation, automation

Acknowledgment: The authors express gratitude to the staff of the Department of “Modeling and Control of Mining Technical Systems” of the Institute for Problems of Integrated Development of Subsoil named after Academician N.V. Melnikov of the Russian Academy of Sciences for consultations and assistance in conducting research.

For citation: Kravtsov A. A., Atrushkevich V. A. Review of modern application of hydraulic technology in coal mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):26-33. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_26_33.

Введение

Гидравлическая добыча подразумевает использование воды для осуществления одной или нескольких технологических операций очистного цикла, таких как отбойка, транспортировка, промывка и сортировка полезных ископа-

емых. В процессе гидравлической добычи вода под высоким давлением направляется на горную породу, размывая и разрушая её. Образовавшаяся пульпа, состоящая из воды и мелких частиц породы, затем транспортируется по специальным каналам или трубопроводам к месту дальнейшей обработки.

Этот метод широко применяется в горнодобывающей промышленности для добычи золота, олова, алмазов и других полезных ископаемых, особенно в тех случаях, когда традиционные методы добычи оказываются неэффективными или экономически нецелесообразными. Гидравлическая добыча позволяет эффективно извлекать полезные ископаемые из рыхлых и слабо сцепленных пород, а также из россыпных месторождений.

Одним из ключевых преимуществ гидравлической добычи является её способность обрабатывать большие объемы материала за относительно короткое время. Эксперименты по использованию высоконапорных струй для добычи угля активно проводились в прошлом веке как в СССР, так и за рубежом. В СССР такие эксперименты начались в 1930-х годах и продолжались вплоть до 1980-х [1,2]. Советские инженеры и ученые активно исследовали возможности применения гидравлической отбойки в различных угольных бассейнах страны, таких как Кузнецкий, Донецкий и Печорский. В ходе этих исследований были разработаны и испытаны различные конструкции гидромониторов и насосных станций, а также методы управления процессом добычи. В некоторых случаях гидравлическая отбойка показала высокую эффективность, особенно в условиях сложных геологических структур и при добыче угля из тонких пластов.

За рубежом, в частности в США, Канаде и Китае, также проводились активные исследования и эксперименты по использованию высоконапорных струй для добычи угля. В этих странах были разработаны свои уникальные технологии и оборудование для гидравлической отбойки. Например, в 60-х годах США был реализован проект механогидравлического комбайна Hydrominer, осуществляющего подрезку угля высоконапорными струями и скалывание угля механическими клиньями. Помимо этого, были проведены эксперименты по добыче с использованием струй различного давления — от 70 до 450 МПа, причем струи более низкого давления показали лучшую энергоэффективность добычи [3].

Несмотря на значительные успехи и перспективы, гидравлическая отбойка угля не получила широкого распространения в промышленном масштабе — комбайны типа longwall для добычи сплошным забоем опередили механогидравлические очистные машины в плане стоимости и скорости добычи. Тем не менее, накопленный опыт и результаты исследований в области гидравлической отбойки угля внесли значительный вклад в развитие горнодобывающей техники и технологий, а также в понимание процессов разрушения и транспортировки горных пород с помощью высоконапорных струй. К тому же струи высокого давления продолжают использоваться для вспомогательных целей при разработке угольных пластов, а новые разработки в области автоматизации и роботизации добычи открывают новые перспективы для гидродобычи.

Цель исследований: анализ современного применения высоконапорных струй в добыче угля, разработка предложений по применению гидродобычи в автоматизированном очистном цикле.

Объект исследования: технология гидравлической добычи, а также современное применение высоконапорных струй в горном деле.

Методы и материалы исследования

Методами исследований выступают поиск и синтез данных из научных статей, отчетов и литературы, отражающих

современное состояние применения гидротехнологии при добыче угля, сравнительный анализ полученных результатов с традиционной технологией добычи.

Результаты исследования и их обсуждение

На сегодняшний день проводятся эксперименты по использованию высоконапорных струй для широкого круга задач проходческого и очистного цикла. Некоторые технологии успешно внедрены, другие находятся на стадии исследований. Особенную важность представляет собой дегазация пластов — в ходе разработки угольных месторождений серьезную опасность представляет метан, заключенный в пластах. Этот газ является чрезвычайно взрывоопасным и может привести к катастрофическим последствиям, таким как взрывы и пожары, что ставит под угрозу жизнь шахтеров и целостность оборудования. Метан образуется в процессе разложения органических веществ и накапливается в угольных пластах на протяжении миллионов лет. При нарушении целостности пласта, например, в процессе бурения или выемки угля, метан может внезапно высвободиться в больших объемах.

Для предотвращения таких опасных ситуаций перед началом выемки угля необходимо провести дегазацию пласта. Дегазация представляет собой процесс удаления метана из угольного пласта и прилегающих пород. Это достигается путем бурения специальных дегазационных скважин, через которые метан выводится на поверхность и утилизируется или используется в качестве топлива. Эффективная дегазация не только снижает риск взрывов и пожаров, но и улучшает условия труда в шахте, уменьшая концентрацию вредных газов в воздухе. Кроме того, удаление метана способствует повышению безопасности и эффективности добычи угля, а также снижает негативное воздействие на окружающую среду, так как метан является мощным парниковым газом.

Для увеличения эффективности процесса Ш. Чуминг, Л. Байкан, С. Чен и др. [4] предлагают увеличить площадь поверхности скважины путем нарезания в ней радиальных щелей высоконапорными струями.

На рис. 1 представлена принципиальная схема устройства для одновременного бурения и нарезания радиальных щелей [5].

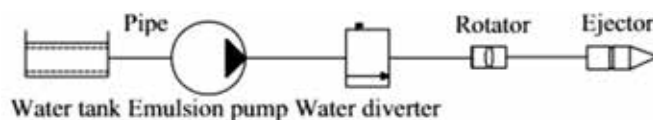


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для бурения и нарезания радиальных щелей

Fig. 1. Scheme of device for drilling and radial slotting

Для оценки эффективности применения радиальных скважин исследователи провели компьютерное моделирование процесса дегазации. Проницаемость породы в разработанной модели описывается формулой (1)

$$k(\sigma, p) = \varepsilon k_0 e^{-\beta(\sigma/3 - \alpha p)} \quad (1)$$

где σ — напряжение, Н/м²;

k_0 — начальная проницаемость, Д;

p — давление газа, Н/м²;

$\alpha, \beta, \varepsilon$ — эмпирически определяемые коэффициенты.

На рис. 2 представлено распределение давления газа вокруг скважины.

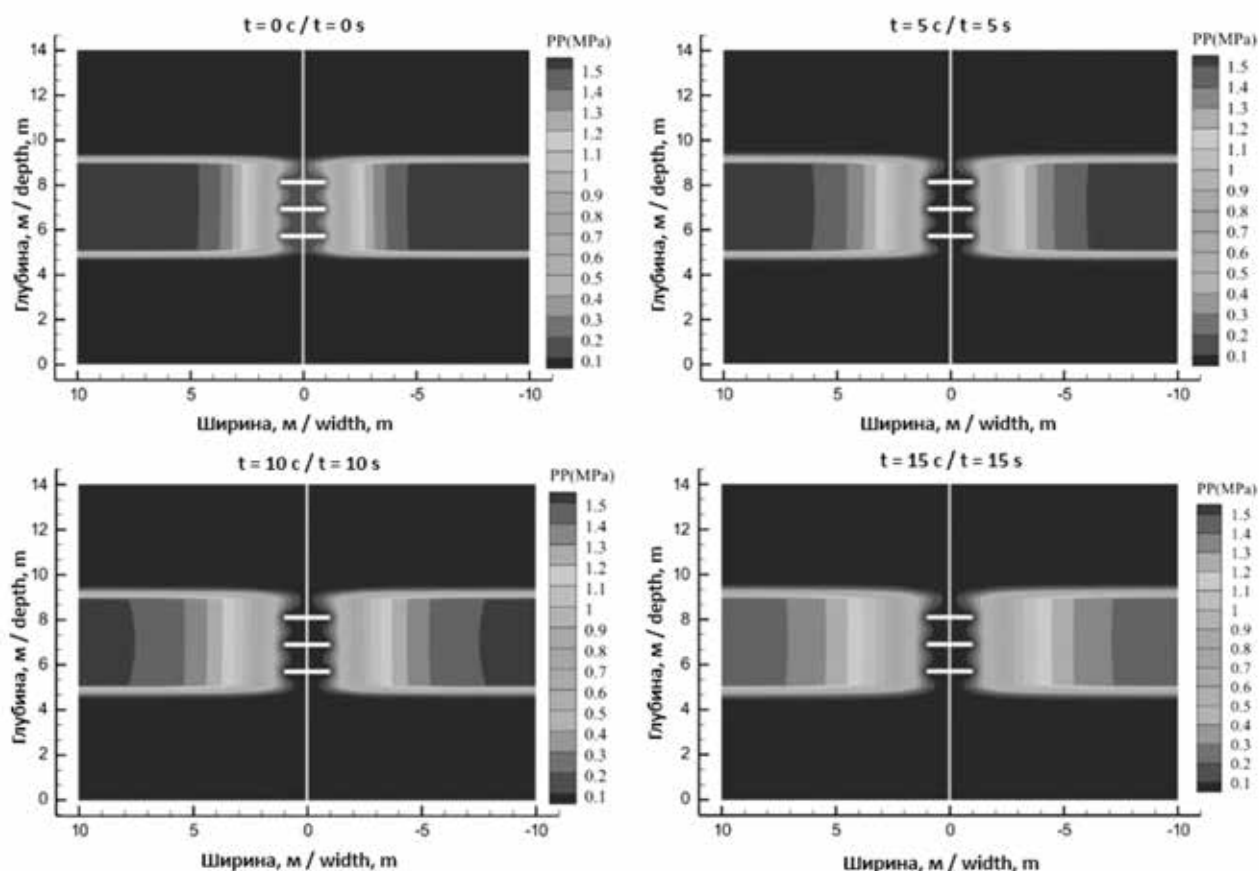


Рис. 2. Распределение давления газа в процессе дегазации в различные моменты времени t
Fig. 2. Spatial distribution of gas pressure during gas drainage at different timestamps t

Также авторы отметили безопасность гидрорезания при дегазации. Во-первых, влажность в области резания сильно повышается, что существенно снижает риск возгорания метана. Во-вторых, повышенная влажность способствует осаждению угольной пыли, являющейся одним из основных факторов риска в угольных шахтах. Так, угольная пыль не только представляет собой взрывоопасный материал, но и негативно влияет на здоровье шахтеров, вызывая заболевания дыхательных путей [6-8].

Другая группа исследователей, включающая Я. Кселин, Х. Липенг, Л. Тинган и др., создала насадку для нарезания радиальных щелей и провела ее полевые испытания. Затем была разработана ее математическая модель (рис. 3).

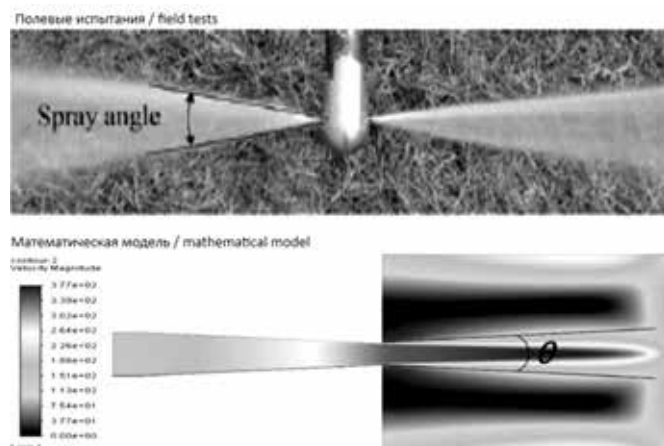


Рис. 3. Полевые испытания и математическая модель насадки для нарезания радиальных щелей в скважине
Fig. 3. Field tests and mathematical model of waterjet radial slotting nozzle

По результатам испытаний были определены оптимальные параметры сопла насадки: диаметр 3 мм, угол распыления 7° и длина 9 мм. Максимальная глубина эффективного резания составила 18 мм, а при попытках резания на глубину более 21 мм эффективность резко снижалась.

Полевые испытания проходили на угольной шахте Руджигоу. Давление воды составило 45 МПа. После нарезания щелей при указанных параметрах насадки и давления скорость извлечения метана увеличилась с $0,126 - 1,476 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $0,138 - 9,198 \text{ м}^3/\text{ч}$. Исследователи пришли к выводу, что нарезание радиальных щелей высоконапорными струями улучшает проницаемость угля и повышает эффективность его дегазации [9].

Группой ученых в составе Л. Ченгвей, К. Бинвейи и Л. Юи была предложена конструкция сопла, генерирующего пульсирующую струю.

Конструкция представлена на рис. 4.

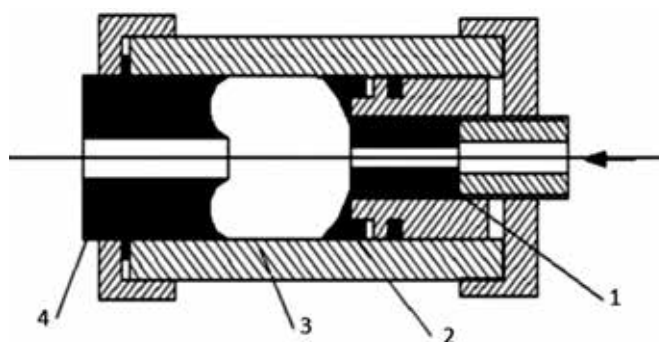


Рис. 4. Конструкция сопла с пульсирующей струей: 1 – входное сопло, 2 – стенка, 3 – кавитационная камера, 4 – выходное сопло /
Fig. 4. Oscillating waterjet nozzle: 1 – inbound nozzle, 2 – wall, 3 – cavitation chamber, 4 – outbound nozzle

Принцип работы сопла заключается в следующем. Струя из входного сопла 1 проходит через кавитационную камеру 3, где часть струи распыляется, и распыленная часть ударяется в стенки 2 камеры. Далее отклоненная таким образом жидкость поступает обратно к входному соплу 1, где разгоняется входящей струей в направлении выходного сопла 4 – таким образом создается пульсирующая струя [10].

График давления постоянной и пульсирующей струи представлен на рис. 5.

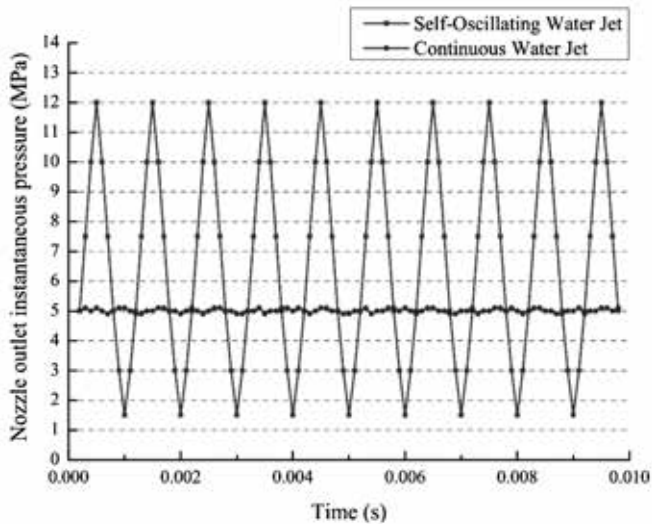


Рис. 5. График давления постоянной и пульсирующей струи от времени
Fig. 5. Pressure-time chart of constant and oscillating water jet

Согласно полевым испытаниям, проведенным на Жонглиангшан Саус Майн, нарезание щелей в скважине пульсирующими струями значительно повысили эффективность дегазации. Графики общего объема извлеченного газа и минутного дебита представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

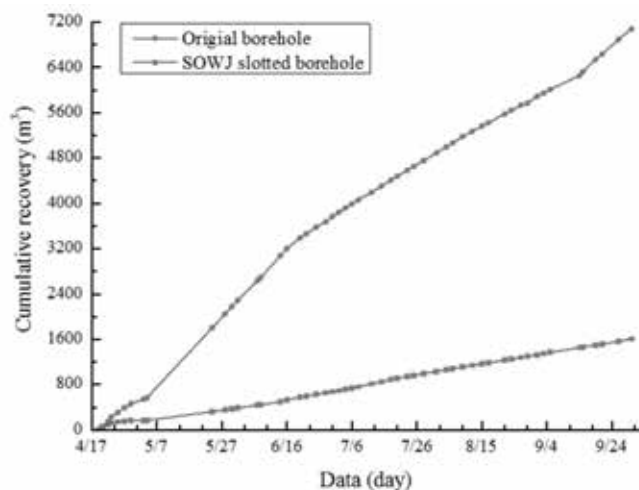


Рис. 6. Общий объем извлеченного газа из обычной скважины и скважины с щелями
Fig. 6. Total volume of extracted gas from conventional and slotted well

Как было показано в данном и в предыдущих исследованиях, нарезание щелей в скважинах значительно увеличивает производительность дегазации. К тому же увеличивается радиус дегазации, что позволяет бурить меньшее количество скважин.

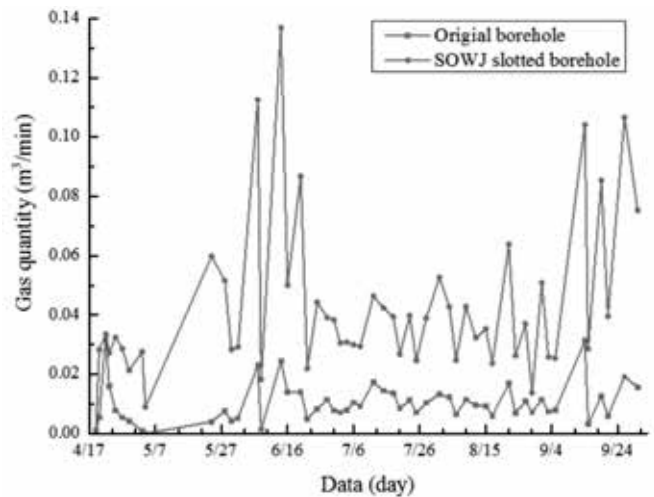


Рис. 7. Минутный дебит обычной скважины и скважины с щелями
Fig. 7. Flow rate per minute of conventional and slotted well

Впрочем, нарезание щелей в выработках может использоваться не только для удаления газа – разгрузочные щели также применяются для управления горным давлением. Эти щели, создаваемые в горных породах, играют важную роль в обеспечении безопасности и стабильности горных выработок. Когда горные породы подвергаются значительным нагрузкам, возникающим из-за горного давления, существует риск обрушения или деформации выработок. Разгрузочные щели помогают перераспределить напряжения в породах, снижая концентрацию напряжений в критических зонах. Это достигается за счет создания контролируемых зон слабости, которые позволяют породам деформироваться более равномерно и предсказуемо.

Л. Тингкан, Я. Зайфенг, Ч. Фантао и Ж. Жичан провели численное моделирование и построили графики распределения горного давления вблизи разгрузочных скважин с радиальными щелями.

На рис. 8 изображено распределение давления при толщине радиальной щели в 10 и 60 мм.

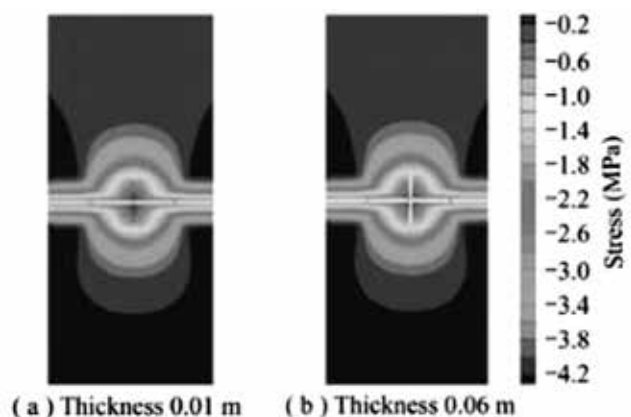


Рис. 8. Распределение горного давления вокруг разгрузочной скважины при толщине радиальной щели в 10 и 60 мм
Fig. 8. Spatial distribution of rock pressure around relief well having radial slot width of 10 and 60 mm

Как видно из графика, наличие щели значительно расширяет зону влияния скважины на горное давление, в то время как толщина щели практически не влияет на распределение давления. Соответственно, тонких высоконапорных струй достаточно для значительного повышения эффектив-

ности разгрузочной скважины [11-13]. Далее исследователи смоделировали влияние нескольких щелей и скважин на горное давление.

На рис. 9 представлено влияние расстояния радиальных щелей на распределение давления, на рис. 10 — влияние взаимного расположения скважин.

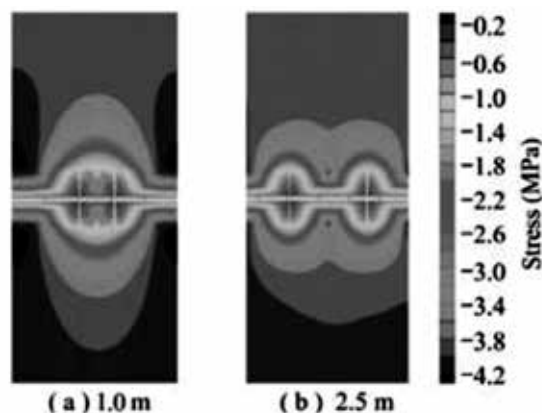


Рис. 9. Распределение горного давления вокруг разгрузочной скважины при расстоянии радиальных щелей в 1 м и 2,5 м

Fig. 9. Spatial distribution of rock pressure around relief well having radial slots spacing of 1 and 2.5 m

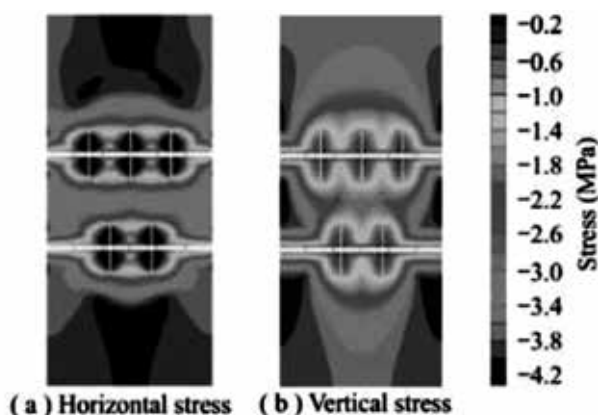


Рис. 10. Распределение горного давления вокруг двух разгрузочных скважин

Fig. 10. Spatial distribution of rock pressure around two relief wells

Авторы исследования делают вывод, что высоконапорные струи могут значительно повысить зону влияния разгруз-

очной скважины, к тому же такие скважины могут служить и для более эффективной дегазации пласта. Нарезание щелей струями не требует сложного оборудования, а необходимые насадки с соплами обладают небольшим размером и легко поместятся в скважину.

Впрочем, не только нарезание щелей, но и сам процесс бурения возможно вести высоконапорными струями. Например, самодвижущиеся гидромониторные буры широко применяются в нефтедобыче для повышения дебита существующих нефтяных скважин путем бурения радиальных скважин от основной. Этот метод позволяет значительно увеличить площадь дренажа и улучшить доступ к нефтеносным пластам, что способствует более эффективному извлечению углеводородов. Радиальные скважины, отходящие от основной, создают дополнительные пути для нефти и газа, что снижает сопротивление потоку и увеличивает скорость добычи [14-16].

Процесс радиального бурения включает использование специализированного оборудования, такого как гибкие буровые трубы и высокоточные навигационные системы, которые позволяют точно направлять буровой инструмент в нужное место. Но в случае бурения дегазационных и разгрузочных скважин процесс значительно упрощается, так как глубина скважины обычно не превышает нескольких десятков метров.

В работе Л. Юи, К. Сонгкианг, Ж. Жаолонг и др. рассмотрены возможности применения самодвижущихся гидромониторных буров в угольных шахтах [17].

На рис. 11 представлено строение гидромониторного бура, на рис. 12 — различные использованные в исследовании буры.

В ходе исследования были определены оптимальные параметры гидравлического бура для угля: угол наклона сопла в продольном направлении 15° , угол наклона сопла в поперечном направлении 90° , расстояние между соплами 2,1 мм. Авторы делают вывод о перспективности применения гидравлических буров для более безопасной и эффективной дегазации угольных пластов [18].

Впрочем, опыты по применению высоконапорных струй не ограничены лишь бурением и дегазацией — также проводились эксперименты по оборке кровли и стен выработок [19,20]. Х. Миллер и М. Кучта описывают испытания оборочных машин, применяющих гидромониторные насадки.

На рис. 13 представлена машина, участвовавшая в эксперименте.

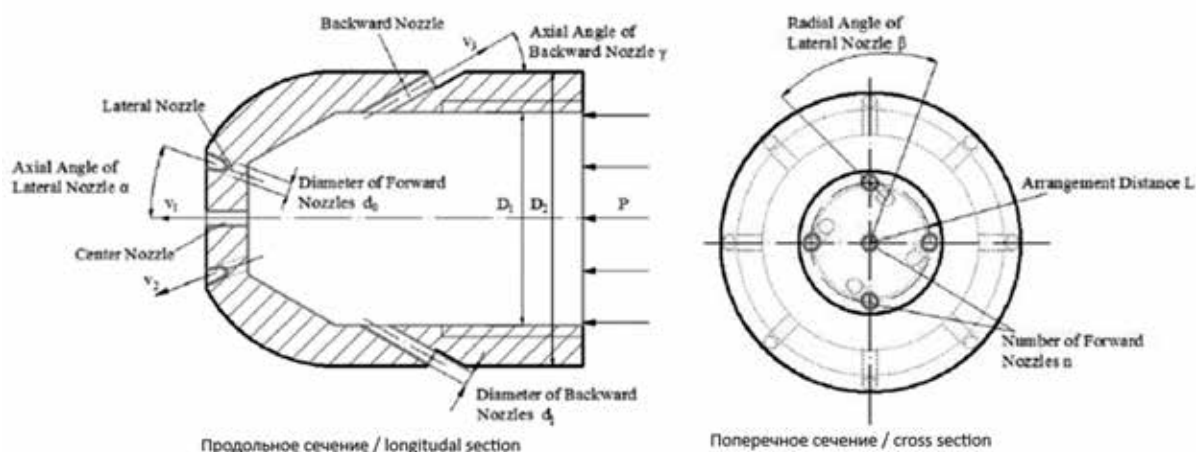


Рис. 11. Строение гидромониторного бура в продольном и поперечном сечении

Fig. 11. Scheme of hydraulic drilling bit in longitudinal and cross section

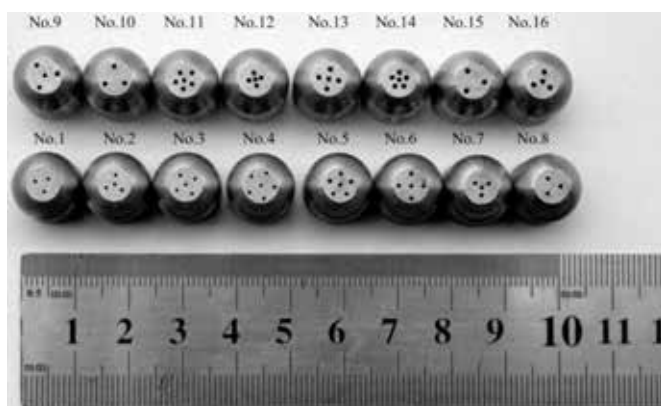


Рис. 12. Использовавшиеся в исследовании гидромониторные буры
Fig. 12. Tested waterjet drilling bits



Рис. 13. Оборочная машина с гидромониторным рабочим органом
Fig. 13. Waterjet rock scaling machine

Несмотря на то, что было испытано небольшое количество различных насадок для формирования струй, эксперимент по гидравлической оборке был признан успешным, производительность работ не уступала механической оборке. Авторы отмечают следующие преимущества гидравлической оборки:

- отсутствие прямого контакта между исполнительным органом и породой;
- возможность направлять струи в разные направления одновременно;
- возможность выборочной отбойки — тонкая струя позволяет точно обрабатывать определенную поверхность, не затрагивая соседние с ней поверхности;
- естественное пылеподавление;
- возможность регулировать давление, расход воды и другие параметры в зависимости от крепости пород;
- простота автоматизации и применения на дистанционно-управляемых машинах.

Авторы отмечают сложности по удалению воды из выработки, с которыми они столкнулись в процессе эксперимента, поэтому необходимо найти баланс между давлением струи и расходом воды. Повышение давления снизит расход воды, но увеличит удельную энергоемкость процесса, что с определенного момента сделает его неэффективным. С другой стороны, большой расход создаст проблемы по удалению и очищению отработанной воды. Тем не менее, для разрушения некрепких пород не требуется большое давление, поэтому задача по поиску наиболее эффективного баланса давление-расход легко выполнима в условиях угольных шахт.

Также следует упомянуть о роботе для испытаний гидро-резания компании HydroCoal Plus (рис. 14).



Рис. 14. Робот для испытаний гидрорезания компании HydroCoal Plus
Fig. 14. HydroCoal Plus robot for waterjet cutting tests

Проект был запущен в 2018 году с целью разработки и внедрения методик, повышающих эффективность и безопасность процессов гидрорезания в горной промышленности. К концу 2019 года были проведены первые полевые испытания в экспериментальной выработке «Барбара». Робот управляется дистанционно с пульта управления. Исследователи установили, что использование струи большего диаметра при сниженном давлении оказывается более эффективным по сравнению с применением тонкой струи с повышенным давлением. В ходе экспериментов учёные определили, что оптимальными параметрами являются давление до 30 МПа и расход воды до 500 л/мин [21].

Заключение

В статье были рассмотрены современные исследования в области применения гидротехнологии при добыче угля, в том числе бурение скважин и шпуров, дегазация, нарезание разгрузочных щелей, оборка. За счет малого размера насадок для гидрорезания становится возможным нарезать радиальные щели в скважинах, что значительно увеличивает скорость дегазации и расширяет площадь влияния разгрузочных скважин на напряжение в горном массиве. Также само бурение скважин возможно реализовать с помощью самодвижущихся гидромониторных насадок — соответственно, бурение и нарезание щелей можно проводить, используя исключительно энергию воды. Также был рассмотрен опыт по оборке кровли выработки машиной с гидромониторным рабочим органом.

Несмотря на активные разработки и внедрение гидродобычи в первой половине прошлого века, сегодня в угольных выработках гидротехнология применяется только для вспомогательных операций. Впрочем, как было указано в рассмотренных статьях, гидротехнология перспективна ввиду малооперационности и легкости автоматизации. Поэтому возрождение исследований применения гидротехнологии совместно с современными средствами роботизации и автоматизации может дать в результате совершенно новые машины и технологии проходки и добычи, аналогов которым не было ранее [22].

Выводы

В статье выполнен анализ современных исследований применения гидротехнологии при добыче угля.

Определены технологические процессы и направления, в которых применение гидротехнологии наиболее целесообразно.

Показано, что проходческие и очистные работы с применением роботизированной или автоматизированной гидро-технологии являются перспективной областью исследований.

Результаты исследований могут быть полезны широкому ряду научных работников и специалистов, исследующих новые способы проходки и выемки угля и других полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грачев Н.П. Состояние и перспективы научных исследований гидромеханизации горных работ. *Записки Горного института*. 1959;41(1):135-139. [Grachev NP. State and perspectives of hydrojet mining scientific research. *Notes of Mining Institute*. 1959;41(1):135-39 (in Russ.)].
2. Кравцов АА, Дмитрак ЮВ, Атрушкевич ВА. Опыт применения подземной гидравлической добычи угля в СССР и России. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023;3(125):18-23. [Kravtsov AA, Dmitrak UV, Atrushkevich VA. Experience of underground hydraulic mining in USSR and Russia. *Mine surveying and subsurface use*. 2023;3(125):18-23 (in Russ.)]. DOI: 10.56195/20793332_2023_3_18_23.
3. Summers DA. *Waterjetting Technology*. Taylor & Francis, 1995.
4. Shen C, Lin B, Sun C, Zhang Q. Analysis of the stress-permeability coupling property in water jet slotting coal and its impact on methane drainage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015;126:231-41. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.11.035.
5. Lin B, Shen C. Coal permeability-improving mechanism of multilevel slotting by water jet and application in coal mine gas extraction. *Environmental Earth Sciences*. 2015;73:5975-86. DOI: 10.1007/s12665-015-4154-8.
6. Lu T, Zhao Z, Hu H. Improving the gate road development rate and reducing outburst occurrences using the waterjet technique in high gas content outburst-prone soft coal seam. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011;48(8):1271-82. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.09.003.
7. Lu Y, Zhang Y, Tang J, Yao Q. Switching mechanism and optimisation research on a pressure-attitude adaptive adjusting coal seam water jet slotter. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022;32(6):1167-79. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.005.
8. Jun X, Yunpei L, Quanle Z, et al. Elimination of coal and gas outburst risk of low-permeability coal seam using high-pressure water jet slotting technology: A case study in Shihuatian Coal Mine in Guizhou Province, China. *Energy Sci Eng*. 2019;7(7):1394-404. DOI: 10.1002/ese3.359.
9. Yang X, He L, Lu T. Optimization and field application of water jet for coal bed methane stimulation. *Energy Science & Engineering*. 2019;7(6):3186-203. DOI: 10.1002/ese3.490.
10. Liu C, Xia B, Lu Y. Coalbed methane extraction using the self-oscillating water jet slotting method. *Energies*. 2018;11(4):897. DOI: 10.3390/en11040897.
11. Lu T, Yao Z, Chang F. Outburst control in soft and outburst prone coal seam using the waterjet slotting technique from modeling to field work. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2012;18:39-48. <https://doi.org/10.1007/s12404-012-0108-x>.
12. Lin B, Yan F, Zhu C. Cross-borehole hydraulic slotting technique for preventing and controlling coal and gas outbursts during coal roadway excavation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;26:518-25. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.06.035.
13. Sang S, Xu H, Fang L. Stress relief coalbed methane drainage by surface vertical wells in China. *International Journal of Coal Geology*. 2010;82(3-4):196-203. DOI: 10.1016/j.coal.2009.10.016.
14. Buset P, Riiber M, Eek A. Jet drilling tool: cost-effective lateral drilling technology for enhanced oil recovery. *SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition*. SPE, 2001:SPE-68504-MS. DOI: 10.2118/68504-MS.
15. Ma DJ, Li GS, Huang ZW, Li J. Mechanism of a self-propelled multi-hole jet bit and influencing rules on its self-propelled force. *Natural Gas Industry*. 2014;34(4):99-104. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.04.016.
16. Di F, Li GS, Huang ZW. Capability analysis of self-feeding multi-nozzle jet bit in radial horizontal drilling. *China Petroleum Machinery*. 2014;42(6):7-11.
17. Lu Y, Xiao S, Ge Z, Zhou Z. Rock-breaking properties of multi-nozzle bits for tree-type drilling in underground coal mines. *Energies*. 2016;9(4):249. DOI: 10.3390/en9040249.
18. Lu Y, Liu Y, Li X, Kang Y. A new method of drilling long boreholes in low permeability coal by improving its permeability. *International Journal of Coal Geology*. 2010;84(2):94-102. DOI: 10.1016/j.coal.2010.08.009.
19. Miller H, Kuchta M. Waterjet Rock Scaling In Underground Mining And Construction Applications. *Jet News*. 2008:4-15.
20. Wang A, Sun P, Zhang Z, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on High-Pressure Water Jet Descaling in Coal Mine Drainage Pipeline. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2022;46:113-30. <https://doi.org/10.1007/s40997-020-00408-y>.
21. Dubiński J, Jura B, Makówka J, et al. In-situ experimental study on hydro-borehole technology application to improve the hard coal excavating techniques in coal mine. *Scientific Reports*. 2023;13(1):1190. DOI: 10.1038/s41598-023-28501-7.

22. Кравцов АА, Анищенко ВИ, Атрушкевич ВА, Пыталев ИА. Перспективы применения технологии WEBRTC для дистанционного управления горным оборудованием. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(4):592-99. [Kravtsov AA, Anischenko VI, Atrushkevich VA, Pytalev IA. Perspectives of applying WEBRTC for remote-controlled mining equipment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;4(46):592-99. (In Russ.)]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-592-599.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Кравцов Алексей Александрович – аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: alexey.kravtsov08@gmail.com

Alexey A. Kravtsov – Postgraduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: alexey.kravtsov08@gmail.com



Атрушкевич Виктор Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела Моделирования геотехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: iugi@mail.ru

Victor A. Atrushkevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development. Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: iugi@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

SOME ASPECTS OF IMPROVING UNDERGROUND MINING DEPOSITS OF COMPLEX STRUCTURE WITH A CONCRETE FILLING

V. T. Hung

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

Abstract: The article details the concept of improving the underground mining of complex structure metal deposits by using systems mined-out spaces with solid mixtures. The purpose of the study is to generalize the experience of intensive ore mining while preserving the earth's surface, as an indicator of the environmentally correct development technology. The research methodology includes observation in full-scale and laboratory conditions, comparison with analogues, experiment, analysis of results, engineering forecasting, semi-industrial and industrial implementation, and theoretical experimentation using standard and new methods. The results of the study. The study highlights the correlation between the performance of ore-bearing stress-deformed rocks, stability of natural and massifs and mine workings. It was determined that structural heterogeneities account for the discrepancy between stresses in massifs and the geostatic distribution law and a mathematical-analytical model for consolidation of discrete rocks was used in the studies. The article shows that voltage regulation makes it possible to use less expensive technologies to reclaim the mined-out space. The study assesses the possibility of using mill tailings, heap leaching, hydrometallurgy, mine waters, ash from and wastewater from CHP plants as part of hardening mixtures. The research also considers the issues of environmental safety. The results of the study can be used in modernization of the existing and design of a new mining production.

Keywords: complex-structure deposit, underground mining, hardening mixture, environment

For citation: Hung V. T. Some aspects of improving underground mining deposits of complex structure with a concrete *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):34-37. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_34_37.

К КОНЦЕПЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ С БЕТОННОЙ ЗАКЛАДКОЙ

В. Т. Хунг

Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам

Аннотация: Статья детализирует концепцию совершенствования подземной разработки металлических месторождений сложной структуры системами с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Целью исследования является обобщение опыта интенсивной добычи руд с сохранением земной поверхности, как гаранта экологической корректности технологии разработки. Методика исследования включает в себя наблюдение в натурных и лабораторных условиях, сравнение с аналогами, эксперимент, анализ результатов, инженерное прогнозирование, полупромышленное и промышленное внедрение, и теоретическое экспериментирование по стандартным и новым методикам. Результаты исследования. Установлены особенности корреляции поведения рудовмещающих напряженно-деформированных пород, устойчивости природных и искусственных массивов и горных выработок. Определено, что не соответствие напряжений в массивах геостатическому закону распределения объясняются наличием структурных неоднородностей и использована математико-аналитическая модель упрочнения дискретных пород. Показано, что регулирование напряжений позволяет применять менее затратные технологии погашения выработанного пространства. Дана оценка возможности использования в составе твердеющей хвостов обогащения, кучного выщелачивания гидрометаллургии, шахтных вод, золы электрофильтров и сточных вод ТЭЦ. Рассмотрены вопросы экологическая безопасности. Результаты исследования могут быть полезны при модернизации действующего и проектировании нового горного производства.

Ключевые слова: сложноструктурное месторождение, подземная разработка, твердеющая смесь, окружающая среда

Для цитирования: Хунг В. Т. К концепции совершенствования подземной разработки месторождений сложной структуры с бетонной закладкой. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 34-37. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_34_37.

Introduction

Complex structure metal deposits are, in most cases, composed of hard rocks and characterized by irregular shapes and placement in the earth's crust and a tendency to accumulate and release stresses (fig.1). [1-3].

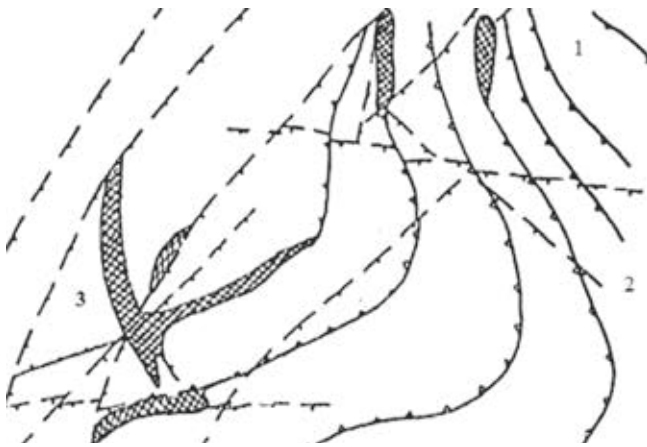


Fig.1. Structure of the Ishimskoye deposit (Kazakhstan): 1– tectonic disturbances; 2–layered deposits; 3– ore bodies

Ore production is associated with damage to the environment which increases as the mining conditions become more complicated [4-6].

The preservation of the natural-technical system is facilitated by development technologies using hardening mixtures for of mined-out spaces, the share of which is limited by the high cost of their components [7-10].

Methods for determining the strength of mixtures depend on the depth of workings, an increase in the arch height of the overlying rocks, an increase in the stress of the developed massifs and a change in the properties of the rocks that compose these massifs under load [11-14]. In this case, the weakening of the rocks is balanced out by an increased strength of the hardening mixture [15-17].

One of the development trends in mining production is increasing the range of technologies using the of mined-out spaces with hardening mixtures; it is to replace the traditional components of the mixture with recyclable waste from mining and related industries [18-21] with an increase in their activity in disintegrator-type devices, combining the phenomena of mechanical and chemical activation [22-25].

The importance of technologies using the of mined-out spaces with hardening mixtures is assessed in various works, including those of Russian mining specialists [26-30]. The purpose of this article is to detail the concept of improving the extraction and processing of ores in the current state of mining production.

Research Methods and Materials

Research of deposit features and analysis of their development results, mathematical and analytical modeling of the relation between the strength of massifs and the size of workings, generalization of data on the possibility of transferring the massif to the volumetric compression mode, mathematical modeling of the assessment of the possibility of using waste.

The research uses generally accepted devices, equipment and methods.

Research results

Geomechanical aspect.

The estimated and actual strength indicators of hardening mixtures by 20...50%. The overwhelming majority of stope workings are with mixtures with a strength of 60...70% and not

up to the roof of the chambers, but this, in the overwhelming majority of cases, is not accompanied by the destruction of massifs and the earth's surface above them.

This can be explained by vaulted structures formed of self-wedging rocks, ensuring the stability of the workings while maintaining

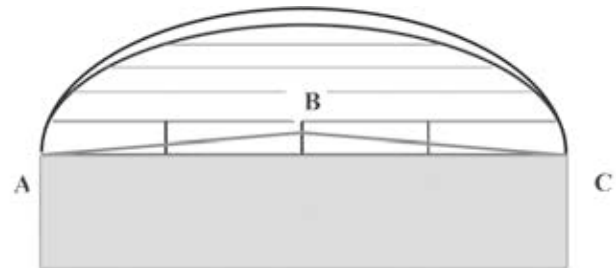


Fig. 2. The scheme of preserving a flat roof in case of an articulated arch: A, B, C – are the hinges of the arch

The interaction of stresses is described by a mathematical-analytical model [Golik, 1990]:

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} = \sigma_{cnc} = \begin{cases} \sigma_{cnc}^0 = \int_0^{L_{0max}} f(x)(dx_1, dx_2, \dots, dx_n); \\ \sigma_{sacc} = \int_0^{L_{0max}} fx(dh_u) \\ \sigma_{sacc} = \int_0^{L_{0max}} fx)(dh_u + dh_c) \\ \sigma_{cnc}^{ocm} \text{ npu } h_c > H; \sigma_{sacc} = \int_0^B dx(dH), \end{cases}$$

where s_1 is the vertical intensity, mPa; $s_{2,3}$ —is the horizontal intensity, mPa; σ_{cnc} — is the intensity in the upper layer of the zone of ence, mPa; σ_{cnc}^o — is the intensity in the bottom layer of the zone of mPa; L_{0max} — is the outcrop span, m; $x_1, x_2, \dots, x_n$ — is the massif properties; σ_{cnc}^{ocm} — is the residual strength of rocks under uniaxial compression, mPa; σ_{sacc} — is the strength of under uniaxial compression, mPa; h_c — is the height of weakening zone, m; h_u — is the height of massif, m; B — is the width of collapse zone, m; H — is the height of collapse zone, m.

Preservation of the earth's surface is ensured by the mined-out space with hardening mixtures with optimization of parameters by transferring the massif to the volumetric compression mode.

The preservation of natural and massifs is ensured by a set of measures:

-
-
- strengthening the wall rocks;
-

Substandard ores with low content of useful components and tailings from their processing stages can be used as material.

Example. At a mining enterprise in Kazakhstan, smelter slags were activated in a disintegrator, converting up to 55% of raw materials with a particle size of -0.074 mm into an active state (Fig. 4).

The from using the technology with the of the mined-out space is described by the formula:

$$\Pi = \left[\left(U - 3 - (Y + 3) \right) \right] \frac{1}{1 + E^{T-1}}$$

where Π — is rubles; U — is the value of the product, rubles; 3 — is the cost of the product, rubles; Y — is environmental

damage, rubles; 3_y – is the cost of eliminating environmental damage, rubles; E . unit; t is time.

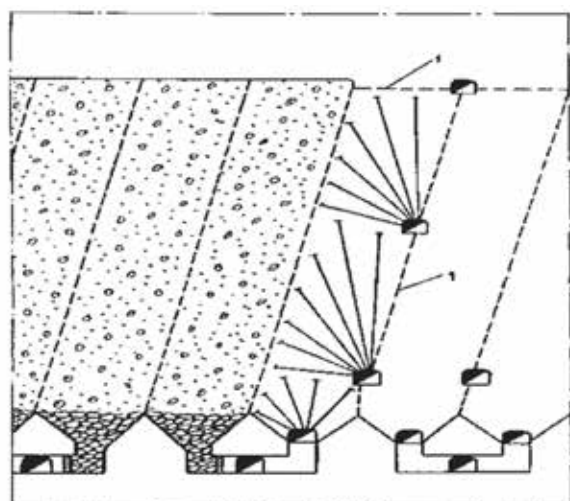


Fig. 3. The slope of the filling mass towards the ore: 1 – shielding gap

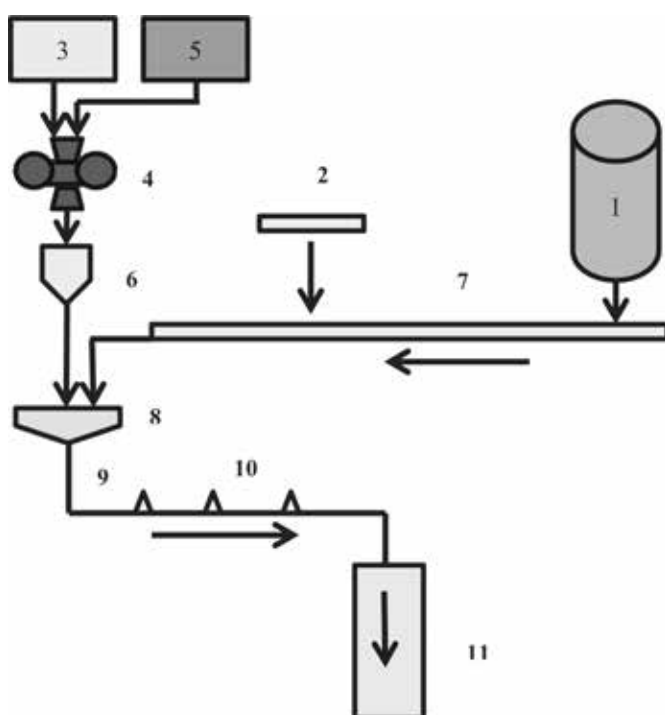


Fig. 4. Scheme of complex activation of hardening mixtures: 1 – cement; 2 – inert fillers screen; 3 – slag; 4 – disintegrator; 5 – water; 6 – vibrating mill; 7 – conveyor; 8 – mixer; 9 – laying pipeline; 10 – vibrators; 11 – block chamber

Results and Discussion

Mining-geological and hydrogeological conditions of solid mineral deposits are best suited by mining technologies for building up massifs from hardening mixtures. Optimization of the standard strength of concrete consists in reducing the time it takes to transfer it to a state of volumetric compression.

The binding properties of additives are increased in activators or by introducing additives into their composition: sodium and calcium chlorides, phosphogypsum hemihydrate, building lime, etc.

The group of additives includes granulated slags, ash from thermal plant electrostatic precipitators, and other low-grade binders with low hydraulic activity. The second group includes inert materials – rock, sand, tailings from enrichment plants, etc.

Activation of materials allows increasing production volumes, returning waste storage areas to economic circulation and reducing the negative impact of waste on the environment.

Reduced cement consumption is achieved by regarding the massif condition when selecting the concrete mix composition for sections of the object. For sections with increased stress concentration, a hardened composition is used, and for sections of less stressed rocks, a composition of lower strength is used.

The use of sodium sulfate salts, sodium chloride and active waters in concrete compositions improves the strength and rheological properties of hardening mixtures, which become more homogeneous, their ultimate shear stress decreases by 15-25%, and their strength increases by 2-3 times.

Cement consumption is reduced by using tailings dam water.

One of the innovative technologies is the use of high-speed mills - disintegrators, the fundamental of which is that the enrichment tailings are mechanically activated while the metals are simultaneously chemically extracted from them.

The economic of tailings disposal is based on the cost of the metals obtained, raw materials for the construction industry and the reduction of environmental damage from tailings storage.

Conclusions

1. It has been established that rock structures arising in massifs make it possible to reduce the strength requirements for massifs

2. It has been that the experience of preparing, transporting and placing hardening mixtures allows us to objectively assess the prospects for using low-cost technologies for the reclamation of mined-out spaces and determine the directions for further development of massif management during underground mining.

3. A tendency has been established to reduce the of components of the hardening mixture by activating its components.

REFERENCES

1. Golik VI, Dmitrak YuV, Komashchenko VI, Razorenov YuI. Ecological aspects of ore tailings storage in the mining region. *Ecology and industry of Russia*. 2018;22(6):35-9 (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-6-35-39>.
2. Klyuyev RV, Bosikov II, Mayer AV, Gavrina OA. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to increase the sustainability of the natural and technical system. *Sustainable development of mountain territories*. 2020;(2):283-90 (In Russ.). DOI:10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.
3. Lyashenko VI. Improving the safety of underground mining of deposits of complex structure. *Mine Surveying and Subsoil use*. 2019;1(99):23-36 (In Russ.).
4. Einbinder II, Patskevich PG, Krasnyukova EV. Substantiation of the parameters of hazardous zones in the combined development of kimberlite deposits in Yakutia. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2019;(3):48-60 (In Russ.).
5. Adero NJ, Drebenstedt S, Prokofieva EN, Vostrikov AV. Spatial data and technologies for geomonitoring land use in the aspect of the development of the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020;(1):69-74. DOI: 10.17580/em. 2020.01.14.

6. Wen J, Li H, Jiang F, Yu Zh, Ma H. et al. Assessment of the risk of rock destruction based on the equivalent strength of surrounding rocks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019;29(4):571-76.
7. Khairutdinov AM, Kongar-Suryun ChB, Kovalik T, Tyulyaeva YuS. Management of the stress-strain state of a rock mass by forming a multi-strength bookmark. *Mining information and analytical bulletin*. 2020;10:42-55. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-42-55.
8. Yin S, Shao Y, Wu A, Wang H, Liu X, et al. A systematic review of the technology of production of pasty materials in metallurgical mines for cleaner production in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019;247:19590.
9. Qi Ch, Fourier A. Backfilling from cemented mass for the management of tailings dumps of minerals: an overview and prospects for the future. *Mineral engineering*. 2019;144:106025.
10. Bumanisa G, Bajarea D. The effect of a sandy microfill on the strength of a cement mortar under compression obtained by collisional grinding in a disintegrator. *Procedia Engineering*. 2017;172:149-156. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.037.
11. Protodiakonov MM. Rock pressure and mine fastening. Part 1. Rock pressure. 3rd ed. M.-L. Novosibirsk: GNTI, 1933. 127 p. (In Russ.).
12. Dinnik AN. On rock pressure and calculation of round shaft support. *An engineering worker*. 1925;7:1-1
13. Slesarev VD. Mechanics of rocks. M.: Ugletekhizdat, 1948. 303 p. (In Russ.).
14. Flores G, Catalan A. Transition from a large open pit to a new geometry of block collapse in the “macroblock version” at the Chuquicamata mine, Chile, Codelco. *Journal of Mining Mechanics and Geotechnics*. 2019;11(3):549-61.
15. Trofimov AV, Kirkin AP, Rumyantsev AE, Yavarov AV. Application of numerical modeling to determine the optimal parameters of the method of complete core unloading when evaluating the stress-strain state of a rock mass. *Non-ferrous metals*. 2020;(12):22-7. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03.
16. Liang W, Zhao G, Wang X, Zhao J, Ma Ch. Assessment of the risk of rock collapse in deep mines using multi-criteria approaches to distance-based decision-making using uncertain fuzzy information. *Engineering geology*. 2019;260:105211. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105211>.
17. ang VK, Vo TH, Do NA, Dao VC. Stability of Deep Underground Mine Drift through Complex Geology Conditions in Quang Ninh Coal Area. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*. 2020:221-30. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-02-27>.
18. Khairutdinov MM, Kongar-Suryun ChB, Tyulyaeva YuS, Khairutdinov A. Cement-free filling mixtures based on water-soluble technogenic waste. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020;331(11):30-6. (In Russ.).
19. Khairutdinov A, Paleev I, Artyomov S. Replacing traditional components of the filling mixture with man-made waste. *IOP conference series: Science of the Earth and the environment*. 2021;904(1):012005. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012005.
20. Simser BP. Management of mining operations at Canadian mines for the extraction of hard rocks. *Journal of Mining Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036-43.
21. Chen G, Chen J, Peng J. The effect of mechanical activation on the structural and microwave absorbing characteristics of high-titanium slag. *Powder technology*. 2015;286:218-22. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.08.021.
22. Golik VI, Razorenov YuI, Dmitrak YuV, Gabaraev OZ. Trends in the development of the mineral resource base of non-ferrous metallurgy of Russia. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Earth Sciences*. 2019;(2):117-28. (In Russ.).
23. Drebenstedt K, Golik VI, Dmitrak YuV. Prospects for diversification of metal mining technologies in the Russian Federation. *Sustainable development of mountain territories*. 2018;(1):125-31. (In Russ.).
24. Dzaparov VKh, Kharebov GZ, Stas VP, Stas PP. Investigation of dry building mixes based on industrial waste for underground construction. *Dry building materials*. 2020;(1):35-8. (In Russ.).
25. Komashchenko VI. Ecological and economic expediency of utilization of mining waste for the purpose of their processing. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2015;(4):23-30. (In Russ.).
26. Tuokuu FH, Kpinpuo SD, Hinson RE. Sustainable development of the gold mines of Ghana: a view of stakeholders. *Journal of Sustainable Mining*. 2019;18(2):77-84. DOI: 10.1016/J.jsm.2019.02.007.
27. Bloodworth A, Gunn G. The future of the world sector of minerals and metals: problems and challenges for the period up to 2050. *Earth Sciences*. 2012;15:90-7.
28. Dominguez Maria S.K., Baptista Adelina L.F., Diogo Miguel Tato. Integrated engineering systems used for risk management in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27:611-16.
29. Maede Tayebi-Khorami, Mansur Edraki, Glen Corder and Artyom Golev. Rethinking mining industry waste through an integrative approach based on the pursuit of a closed-loop economy. *Minerals*. 2019;(9):1-13. DOI 10.3390/min9050286.
30. Zhou X, Nguyen H, Hung VT, Lee C-W, Nguyen V-D. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system and differential evolutionary optimization for predicting rock displacement in tunnels and underground spaces. *Structures*. 2023;48:1891-906. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.059.

ABOUT THE AUTHOR

Vo Trong Hung -

Prof., Faculty for Construction, Department for Underground and Mines Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam,
e-mail: votronghungbunbin@gmail.com

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Во Чонг Хунг —

проф., строительный факультет, кафедра «Подземного и шахтного строительства», Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам,
e-mail: votronghungbunbin@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

И. В. Артемов, М. Б. Носырев

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Технология цифровых двойников (ЦД) является относительно новым методом повышения эффективности и удобства выполнения многих технологических операций горного производства. Раскрыт термин «цифровой двойник», его происхождение и то, что под ним понимают разные исследователи. Дано несколько видов классификаций и схем структуры цифровых двойников, проанализированы примечательные случаи успешного применения данной технологии в горнодобывающей отрасли.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая трансформация, горная промышленность, трехмерная модель, модель процесса

Благодарность: Коллектив авторов выражает благодарность преподавательскому и руководящему составу Уральского государственного горного университета.

Для цитирования: Артемов И. В., Носырев М. Б. Технология цифровых двойников и ее применение в горнодобывающей промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 38-43. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_38_43.

THE DIGITAL TWIN TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION FOR MINING INDUSTRY

I. V. Artemov, M. B. Nosyrev

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

Introduction. The material production is a main component in almost any kind of economy. It is always a high-tech industry, that must meet the requirements of efficiency, performance and competitiveness. To satisfy all these demands the material industry often needs to be transformed into digital industry. This process consists of the development and application of digital platforms, digital twins of real objects and processes, as well as the transition to cyber-physical systems. These global changes are accompanied by the development of fundamentally new business processes and business models at all levels.

The development and application of digital twins is an advanced technology (although it is based on quite old ideas), it is an integrator of “end-to-end” digital technologies and new production capabilities (primarily digital design and modeling). It provides a significant contribution to the creation of globally competitive next-generation products in the shortest possible time.

Research results: In this article we present a description of Digital Twin term in its diversity. Multiple kinds of digital twin’s classification were given and also we introduce many examples of this technology’s usage in mining industry.

Conclusion. As we can see, the digital twin idea is relatively young, but it is based on some quite old principles of cybernetics and modeling. Since the term was formally introduced, many practical applications of digital twins have been found.

Resume. The increasing amount of scientific advancements made the effective usage of digital twins possible. They are successfully applied in mining industry, and not only for educational purposes – it helps to increase the manufacturing productivity and avoid some unintended consequences in rock mining.

Keywords: digital twin, digital transformation, mining industry, 3D-model, process model

Gratitude: The team of authors expresses gratitude to the teaching and management staff of the Ural State Mining University.

For citation: Artemov I. V., Nosyrev M. B. The digital twin technology and its application for mining industry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):38-43. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_38_43.

Введение

Практически в любой экономике центральное место отводится материальному производству — высокотехнологичной промышленности, отвечающей требованиям эффективности, производительности труда и конкурентоспособности в глобальном смысле. Для того что-

бы удовлетворить этим требованиям, зачастую приходится прибегать к внедрению большого количества цифровых технологий в высокотехнологичной промышленности. Это заключается в разработке и применении цифровых платформ, цифровых двойников (Digital Twin) реальных объектов и процессов, а также в осуществлении перехода к киберфизиче-

ским системам. Эти глобальные изменения сопровождаются развитием принципиально новых бизнес-процессов и бизнес-моделей на всех уровнях.

Разработка и применение цифровых двойников — это передовая технология (хотя она и основана на достаточно старых идеях), является интегратором «сквозных» цифровых технологий и новых возможностей производства. Использование цифровых двойников обеспечивает весомый вклад в создание конкурентоспособной продукции нового поколения в кратчайшие сроки [1].

Цель исследований — соотнести различные подходы к терминологии и классификации цифровых двойников, кратко описать сходства и различия пониманий. Найти и выделить группы способов эффективного практического применения цифровых двойников в горнодобывающей промышленности и смежных отраслях.

Материал и методы исследований

В данной работе были найдены и проанализированы новые публикации по тематике цифровых двойников и цифровой трансформации, в которых делался акцент на полезном эффекте от их применения в горнодобывающей отрасли.

Результат работы

В результате удалось выделить несколько подходов к пониманию и классификации цифровых двойников, а также несколько логических групп применения данной технологии в горном деле.

Что такое цифровой двойник?

Концепция физического двойника, существовавшая до цифровых двойников, является довольно старой и относится к программе NASA «Аполлон». Тогда были построены два одинаковых космических аппарата, причем один из них остался на Земле и получил название «Двойник». «Двойник» использовался для точного отражения условий полета, запуска моделирования и таким образом помогал астронавтам найти наилучшие возможные решения возникавших перед ними задач. Естественно, создание физического двойника каждого актива или объекта является дорогостоящим и непрактичным. Из-за этого идея физического двойника была трансформирована до создания цифрового двойника.

Важно отметить, что цифровые двойники в космической отрасли применяются и в России. К примеру, в 2023 году специалисты из Роскосмоса упоминали о внедрении цифрового двойника для управления отечественным космическим спутником [2].

Майкл Гривс впервые представил идею ЦД в 2003 году как цифровую информационную конструкцию физической системы, которая оптимальным образом включает в себя всю информацию, необходимую для выполнения поставленной задачи, и связана с рассматриваемой физической системой [3, 4].

Основными компонентами ЦД являются:

- 1) физический компонент,
- 2) виртуальная модель,
- 3) данные, связывающие компоненты.

Поток данных от физического компонента к виртуальной модели требует обработки для преобразования в полезную информацию. Поток данных из виртуального мира в физический представляет собой уже обработанную информацию, которую можно использовать для управления физическим объектом.

Первое формальное определение ЦД было дано в 2012 году как интегрированное мультифизическое, многомасштабное, вероятностное моделирование транспортного средства или системы, которое использует лучшие доступные физические модели, данные датчиков, историю их изменений и т. д., чтобы отразить функционирование своего двойника. Хотя эта концепция возникла в аэрокосмической отрасли, она получила распространение во многих других отраслях, таких как производство и строительство [5].

Если проанализировать различные трактовки термина «цифровой двойник», то окажется, что это определение лежит между двумя крайностями: от широкого толкования (ЦД — это все проекты, где создают любую цифровую копию любого объекта) до самого узкого толкования, когда ЦД называют решение, которое соответствует выполнению целого ряда жестких требований, направленных на повышение уровня соответствия ЦД реальному объекту: моделирование материалов на микро- и макроуровне, одновременное наличие разных видов моделей (статистической, физической и др.) [6].

Данный вывод может быть выражен в виде формулы с аппаратом теории множеств:

$$M_{copy} = M_{multi} \cup M_{predict} \cup M_{industry}$$

где M_{copy} — обобщенное определение цифрового двойника;

M_{multi} — множество определений, где ЦД считается мультидисциплинарной моделью, получающей данные об объекте в реальном времени;

$M_{predict}$ — множество определений, где ЦД считается моделью для прогнозирования поведения своего физического прообраза;

$M_{industry}$ — множество определений, где ЦД считается любой цифровой копией промышленного изделия.

Неоднозначность в понимании термина «цифровой двойник» не помешала исследователям и разработчикам в проработке и практическом применении данной концепции, что будет видно далее.

Классификация цифровых двойников

Майкл Гривс разделил цифровых двойников на следующие типы [3]:

1) прототип цифрового двойника (Digital Twin Prototype). Содержит высокую степень точности, но при этом не включает в себя результатов измерений, поступающих от конкретного реального объекта. Прототип обычно включает требования к продукту, 3D-модель с полной аннотацией, спецификацию материалов, спецификацию процессов, спецификацию утилизации;

2) экземпляр цифрового двойника (Digital Twin Instance). Описывает конкретный реальный объект, с которым экземпляр остается связанным на протяжении всего жизненного цикла. Экземпляр включает данные о настройках модели, параметрах управления, информацию с датчиков и исторические сведения для изделия, устройства или процесса. С использованием экземпляров возможно прогнозирование состояния;

3) агрегат цифровых двойников (Digital Twin Aggregate) — это система, объединяющая все экземпляры ЦД, которые могут и не обладать независимой уникальной структурой данных. Вместо этого экземпляры могут обмениваться данными друг с другом.

Данная классификация — не единственная.

К примеру, General Electrics классифицирует ЦД по уровню сложности и выделяет четыре следующих уровня [6]:

1) ЦД компонента (например, ЦД шестеренки) может использоваться, чтобы заранее сигнализировать о возможном выходе из строя этого компонента;

2) ЦД актива (например, ЦД двигателя внутреннего сгорания, электропривода или бензонасоса) состоит из одного или нескольких ЦД компонентов и может анализировать ресурс узла в целом;

3) ЦД комплексного объекта (например, ЦД экскаватора или буровой установки) способен оптимизировать работу всей системы исходя из массива показателей;

4) ЦД процесса обычно является двойником еще более сложного объекта. Он дает представление о наборе действий, составляющих большой производственный процесс. Цифровой двойник процесса может быть построен на базе набора двойников активов или систем.

Применение цифровых двойников в горной промышленности

Цифровые двойники широко применяются в области добычи ископаемых, о чем свидетельствует большое количество публикаций с сообщениями о реализованных и успешно внедренных системах [7]. Общий подход применения цифрового двойника для горнодобывающей техники (схема подходит и для других производственных отраслей) представлен на рисунке.

Физический мир (физическая среда) состоит из физического объекта или процесса, сенсоров и актуаторов. Цифровая среда состоит из самого цифрового двойника, базы данных, систем машинного обучения и цифровой обработки данных. Обе среды взаимодействуют через коммуникационный элемент, который обладает несколькими интерфейсами (Wi-Fi, Bluetooth, проводное подключение). Для конечного пользователя такая архитектура предоставляет возможности постоянного мониторинга и визуализации результатов [8].

Прежде всего ЦД широко используются при производстве техники, в том числе предназначенной для добычи и транспортировки горной породы. Большинство ЦД, которые используются в реальном производстве, находятся на той стадии развития, когда ЦД взаимодействует со своим физическим оригиналом только для того, чтобы оставаться

с ним в состоянии синхронизации. Эти ЦД также могут служить шлюзом для других приложений (например, аналитических). Если аналитическое ПО обнаруживает какую-либо аномалию, то сигнал поступит к еще одному внешнему приложению, а затем – на реальный объект [9].

В [10] описано использование ЦД для численного моделирования потока сыпучих материалов при добыче угля. В этом примере вагонетки перевозят добытый уголь от месторождения к пункту его приема. Из каждой вагонетки выгружается сырье, которое затем попадает на свой конвейер, а далее поступает на питатель, который подает фрагменты угля в дробильную установку. При этом если разгружается одновременно более одной вагонетки, то общий показатель массового расхода может превысить допустимый уровень для дробильной установки. Это приводит к застреванию фрагментов угля и повреждению оборудования. Лучшим подходом к анализу и выявлению таких ситуаций, по мнению инженеров, является создание цифрового двойника с последующим точным численным моделированием.

В [11] цифровой двойник используется для принятия технологических решений в процессе отработки очистного забоя угольной шахты при добыче угля. Решение было актуальным, т. к. внешней средой по отношению к процессу очистного забоя является угольный пласт, у которого тяжело измерить геологические и механические параметры непосредственно в точке нахождения очистного комбайна. В результате исследования авторами была получена имитационная модель, включающая модели горных машин и модель угольного пласта, которые связаны между собой.

В [12] инженеры также используют ЦД для мониторинга состояния шахт.

Помощь цифрового двойника в увеличении эффективности производства описана и в [13]. Автор упоминает использование цифрового двойника для мельницы измельчения золотосодержащей руды. Поскольку на золотообогатительных фабриках большая доля электроэнергии расходуется именно мельницами на участках измельчения руды, то оптимизация процесса, выполненная с использованием ЦД, имела серьезный экономический эффект. Цифровой двойник отвечал за

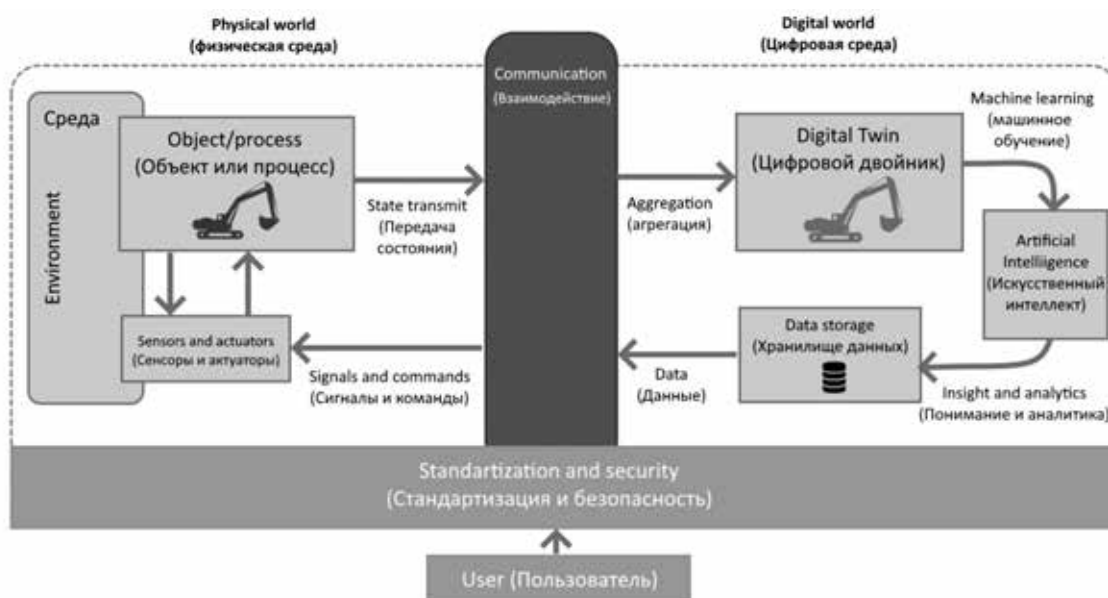


Рис. Общая архитектура взаимодействия компонентов цифровых двойников

Fig. The overall architecture of digital twins' components' interactions

определение режима, в котором работает мельница, оптимизацию графика плановых ремонтов, прогнозирование износа компонентов.

В [14] идет речь об использовании цифровых двойников для обучения студентов (в частности — металлургического профиля). Среди доводов в пользу такого решения приводится то, что обучение на реальных установках является дорогостоящим, а также связанным с риском для жизни (студентом потребовалось бы изучать и соблюдать большое количество требований безопасности). Описывается имеющаяся реализация цифрового двойника в виде интерактивной 3D-модели в виртуальной реальности.

Похожие цели преследуют авторы [15]. В работе описана система поддержки для инструкторов по управлению экскаваторами, которая основана на идее цифрового двойника. В созданной системе использовались несколько видов обратной связи от реального экскаватора к его двойнику: положение рукояти, скорость движения ковша, траектория загрузки ковша и точка его разгрузки.

В [16] также упоминается пример разработки цифрового двойника для экскаватора за авторством фирмы ConXR Development. Авторы задались целью разработать подобную систему, чтобы работа на экскаваторе стала возможна в удаленном формате (целесообразность была обусловлена вирусом COVID-19).

Симуляция функционирования одноковшового экскаватора была частично воплощена в имитационном комплексе EKG-18R [17]. В частности, были смоделированы кинематика экскавации и перенос энергии с основных приводов. Принцип действия комплекса основан на вычислительной модели экскаватора, которая максимально близка к реальному оборудованию. Причем в модели были учтены возможные разновидности установленных электрических приводов.

Авторы [18] раскрывают концепцию использования цифровых двойников тяжелой горнодобывающей техники в сочетании с динамически формируемой моделью окружающего пространства для предотвращения столкновений спецтехники. По словам разработчиков системы, наезд крупногабаритной техники на легковой автотранспорт и людей является наиболее распространенным в статистике

несчастных случаев при добыче пород. Большинство подобных инцидентов происходит из-за плохого обзора оператора спецтехники.

Основной акцент в [19] сделан на технической реализации того, как именно можно эффективно обрабатывать данные с датчиков экскаватора, чтобы точно и своевременно обеспечивать обновление состояния его цифрового двойника. Для отслеживания «глобальной» позиции техники в пространстве авторы используют GPS. Для относительных позиций предлагается использовать акселерометры и лазерные приборы на кабине и стреле экскаватора.

В [20] описано создание цифрового двойника («визуально-го прототипа») рабочего места оператора в кабине карьерного экскаватора, что использовалось для сбора и анализа данных об эргономических характеристиках. Кроме ЦД кабины разработчикам потребовалось применить и модель условного машиниста, «манекен» которого помещается в виртуальную кабину ЦД экскаватора.

Заключение

В сообществе исследователей встречается мнение о том, что идея цифрового двойника, в сущности, не несет в себе ничего нового, т. к. можно сказать, что это просто продолжение техники применения модели в сочетании с процессами обратной связи. Разница лишь в том, что это делается в условиях более совершенных технологий и с использованием технических возможностей, которые не были доступны ранее (например, машинное обучение, чувствительные сенсоры, широкополосная передача данных).

Действительно, идея цифровых двойников, по сути, основана на классической идее кибернетики, в которую были привнесены такие элементы, как постоянное добавочное обучение имитационной модели, техники прогнозирования состояния объекта-оригинала [21].

Как видим, новые технологические условия позволили успешно использовать цифровых двойников во многих сферах горнодобывающей отрасли. ЦД помогают обучать операторов, совершенствовать эргономику элементов управления, предотвращать аварии и увеличивать эффективность многих технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боровков АИ, Гамзикова АА, Кукушкин КВ. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. СПб.: Политех-Пресс, 2019. 62 с. [Borowkov AI, Gamzikova AA, Kukushkin KW. Digital twins in high-tech industry. Saint-Petersburg, 2019 (In Russ)].
2. Ячменникова Н. Цифровой двойник спутника: 3D-технология будет управлять космическими аппаратами на орбите [Электронный ресурс]. Роскосмос. URL: <https://www.roscosmos.ru/39013/> (дата обращения: 18.07.2024). [Yachmennikova N. Digital twin of a satellite: 3D-technology will control space equipment on an orbit. Available from: <https://www.roscosmos.ru/39013/> 2019 (In Russ)].
3. Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Luxembourg, 2017:85-113.
4. Uhlemann T, Lehmann C, Steinhilper R. The digital twin: Realizing the cyberphysical production system for industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2017;61:335-40.
5. Agrawal A, Fischer M, Singh V. Digital Twin: From Concept to Practice. *Journal of Management in Engineering*. 2022;38(3):112-57.
6. Прохоров А, Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2020. 401 с. [Prokhorov A, Lisachev M. Digital twin. Analysis, trends and worldwide experience. Moscow, 2020. (In Russ)].

7. Трегуб ОС, Бахаева ЮВ, Варламов ПП. Использование цифровых двойников в горнодобывающей промышленности. *Образование. Наука. Производство: мат-лы XIV Межд. молод. форума*, Белгород, 13–14 октября 2022 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. С. 164–168. [Tregub OS, Bakhaeva OV, Varlamov PP. The use of digital twins in the mining industry. *Education. The science. Production. Materials of the XIV International Youth Forum*. Belgorod, 2022:164-8 (In Russ)].
8. Botin-Sanabria DM, Mithaita AS, Peimbert-Garcia RE. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sens.* 2022;14:220-45. DOI: 10.3390/rs14061335.
9. Saracco R. Digital Twins: Evolution in Manufacturing. *IEEE Digital Reality*. Available from: <https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/2022may-ebook-digitaltwins-manufacturing2.Pdf>.
10. Принслу В. Использование цифровых двойников при работе с сыпучими материалами. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2019;5(129):55–57. [Prinsloo V. Using digital twins when working with bulk materials. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2019;5(129):55-7 (In Russ)].
11. Окольнішников ВВ, Ордин АА, Рудометов СВ. Разработка цифровой модели очистного забоя угольной шахты. *Автометрия*. 2021;57(6):113–123. [Okolnishnikov VV, Ordin AA, Rudometov SV. Development of a digital model of a coal mine treatment face. *Autometry*. 2021;57(6):113–23 (In Russ)]. DOI: 10.15372/AUT20210612.
12. Kalinowski P, Dlugosz O, Kaminski P. Digital twin of the mining shaft and hoisting system as an opportunity to improve the management processes of shaft infrastructure diagnostics and monitoring. *IntechOpen*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349658892_Digital_Twin_of_the_Mining_Shaft_and_Hoisting_System_as_an_Opportunity_to_Improve_the_Management_Processes_of_Shaft_Infrastructure_Diagnostics_and_Monitoring
13. Хитрых Д. Цифровые двойники: прошлое, настоящее и будущее. *Управление производством*. 2021;(4): 30–35. [Khitrykh D. Digital twins: past, present and future. *Production Management*. 2021;(4):30-5 (In Russ)].
14. Баранов ВН, Безруких АИ, Константинов ИЛ. Использование цифрового двойника для обучения студентов металлургического профиля. *Высшее образование в России*. 2022;31(2):135–148. [Baranov VN, Bezrukikh AI, Konstantinov IL. Using a digital twin to train metallurgical students. *Higher education in Russia*. 2022;31(2):135-48 (In Russ)].
15. Vahdatikhaki F, Scholtenhuis L, Doree A. Digital Twin-based Instructor Support System for Excavator Training. *41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2024)*. Available from: https://www.iaarc.org/publications/2024_proceedings_of_the_41st_isarc_lille_france/digital_twin-based_instructor_support_system_for_excavator_training.html.
16. Seaton H, Savian C, Sepasgozar S. Digital twins from design to handover of constructed assets. *RICS World Built Environment Forum*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/360157938_Digital_twins_from_design_to_handover_of_constructed_assets.
17. Shibanov DA, Ivanov SL, Shishkin PV. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:206-12. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.
18. Рентюк В. Система предупреждения столкновений Visionary-B от Sick для спецтехники. *Control Engineering*. 2021;93(3):50–56. [Rentyuk V. Visionary-B collision avoidance system from Sick for special equipment. *Control Engineering Russia*. 2021;93(3):50-6 (In Russ)].
19. Talmaki S, Kamat VR. Sensor Acquisition and Allocation for Real-Time Monitoring of Articulated Construction Equipment in Digital Twins. *Sensors*. 2022;22:259-81. DOI: 10.3390/s22197635.
20. Великанов ВС, Ильина ЕА, Кочержинская ЮВ. Визуализация и анализ информации об эргономике рабочего места на основе компьютерного прототипирования конструкции кабины карьерного экскаватора. Вестник Череповецкого государственного университета. 2022;1(106):18–30. [Velikanov VS, Ilyina EA, Kocherzhinskaya YuV. Visualization and analysis of information about the ergonomics of the workplace based on computer prototyping of the design of a mining excavator cabin. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2022;106(1):18-30 (In Russ)].
21. Дозорцев ВМ. Цифровые двойники в промышленной автоматизации – на пике моды или наступившее будущее?. *Автоматизация в промышленности*. 2022;(7): 3–14. [Dozortsev V. Digital twins in industrial automation - at the height of fashion or the coming future. *Automation in industry*. 2022;(7): 3-14 (In Russ)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Артемов Иван Владимирович –
аспирант направления «Искусственный
интеллект и машинное обучение» УГГУ,
Уральский государственный горный университет,
г. Екатеринбург, Россия, Scopus Author ID:
57022242500, e-mail: imperfect-post@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Artemov –
specialist, postgraduate student, direction of Artificial
Intelligence and Machine Learning, Ural State Mining
University, Yekaterinburg, Russian Federation, Scopus
Author ID: 57022242500, e-mail: imperfect-post@
yandex.ruru



Носырев Михаил Борисович –
доктор технических наук, профессор, Уральский
государственный горный университет, г.
Екатеринбург, Россия, Scopus Author ID:
57194022210, e-mail: nosyrev.mb@mail.ru

Mikhail B. Nosyrev –
Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural State Mining University,
Yekaterinburg, Russian Federation, Scopus Author ID:
57194022210, e-mail: nosyrev.mb@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации / The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В. А. Иодис, С. О. Очеретяна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТИ ДВО РАН), г.Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация: Дана оценка влияния ультразвуковой обработки рудной пульпы на кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания металлов. В ходе проведения экспериментов была принята интенсивность ультразвуковых колебаний – 4,0, 7,2, 11,0, 21,0 Вт/см² при частоте 22 кГц и полной мощности генератора ультразвуковых колебаний 400 Вт. Ультразвуковая обработка в проточной камере смонтированной лабораторной установки проводилась в течение 30 минут. Через промежутки 1, 3, 10, 15 и 30 минут осуществлялся отбор проб, определялись pH, Eh и количество клеток микроорганизмов в 1 мл рудной пульпы. Анализ литературных данных показал, что ультразвуковая обработка интенсивностью более 20 Вт/см² твердой фазы рудной пульпы в течение 15–20 минут обеспечивает очистку поверхности кристаллических фаз от оксидных пленок. Это позволяет интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания. Проведенные эксперименты показали, что ультразвуковое воздействие при интенсивности от 21 Вт/см² и выше при продолжительности процесса более 1 200 секунд, частоте колебаний 22 кГц инактивирует микроорганизмы, что снижает кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания. Из этого следует, что для повышения кинетики процесса выщелачивания целесообразно отдельно воздействовать ультразвуком на рудную пульпу для очистки поверхности от оксидных пленок, далее смешивать пульпу с бактериальной суспензией и затем проводить процесс бактериально-химического выщелачивания.

Ключевые слова: бактериально-химическое выщелачивание, ультразвуковое воздействие, рудная пульпа, оксидные пленки, pH, Eh, хемолитотрофные микроорганизмы, лабораторная установка

Для цитирования: Иодис В. А., Очеретяна С. О. Исследование влияния ультразвукового воздействия на кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания металлов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 44–48. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_44_48.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ULTRASONIC INFLUENCE ON THE KINETICS OF THE PROCESS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF METALS

V. A. Iodis, S. O. Ocheretyana

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russian Federation

Abstract: This work was carried out to study the effect of ultrasonic treatment of ore pulp on the kinetics of the process of bacterial-chemical leaching of metals. The intensities of ultrasonic vibrations chosen for the experiment were 4.0, 7.2, 11.0, 21.0 W/cm², at a frequency of 22 kHz, and the total power of the ultrasonic vibration generator was 400 W. Ultrasonic treatment in the flow chamber of a mounted laboratory installation was carried out for 30 minutes. After 1, 3, 10, 15 and 30 minutes, samples were taken, pH, Eh and the number of microorganism cells in 1 ml of ore pulp were determined. Analysis of literature data showed that ultrasonic treatment with an intensity of more than 20 W/cm² of the solid phase of ore pulp for 15–20 minutes ensures the cleaning of the surface of crystalline phases from oxide films. This will intensify the process of bacterial-chemical leaching. The experiments showed that ultrasonic exposure at an intensity of 21 W/cm² and higher, with a process duration of more than 1200 s, and an oscillation frequency of 22 kHz, inactivates microorganisms, which will reduce the kinetics of the bacterial-chemical leaching process. It follows from this that in order to increase the kinetics of the process, it is advisable to separately apply ultrasound to the ore pulp to clean the surface of oxide films, then mix the pulp with a bacterial suspension and carry out the process of bacterial-chemical leaching.

Keywords: bacterial-chemical leaching, ultrasonic influence, ore pulp, oxide films, pH, Eh, chemolithotrophic microorganisms, laboratory installation

For citation: Iodis V. A., Ocheretyana S. O. Study of the influence of ultrasonic influence on the kinetics of the process of bacterial-chemical leaching of metals. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):44–48. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_44_48.

Введение

Одним из направлений повышения кинетических характеристик бактериально-химического выщелачивания руд является использование воздействия различных физических полей в процессе реакторного бактериально-химического окисления минеральных компонентов пульпы. Наиболее эффективным вариантом представляется интенсификация бактериально-химических процессов с применением ультразвуковой активации.

Существуют данные [1–3], что ультразвуковая обработка при интенсивности более 20 Вт/см² твердой фазы рудной пульпы в течение 15–20 минут в условиях кавитационного режима с кумулятивными струями обеспечивает высокую степень очистки поверхности кристаллических фаз от оксидных пленок, что позволяет существенно интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания. Однако применение ультразвука может как стимулировать, так и снижать рост численности микроорганизмов, находящихся в пульпе. Использование ультразвукового воздействия интенсивностью более 10 Вт/см² с частотами от 20 до 100 кГц для резкого снижения численности бактерий исследуется с середины XX века [4]. Резкое снижение численности микроорганизмов при ультразвуковой обработке зависит не только от интенсивности излучения, но также от частоты колебаний, продолжительности процесса обработки, давления и температуры [5].

Цель работы

Исследование влияния ультразвуковой обработки рудной пульпы на кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания металлов.

Материал и методы исследования

Руда. В работе использовали образцы сульфидных руд медно-никелевого месторождения Шануч. Исходное содержание металлов в образце руды: 4,32–4,79% Ni; 0,61–0,75% Cu; 0,094–0,12% Co [6, 7]. Степень измельчения руды 100% – 100 мкм.

Бактериальная культура. Увеличение биомассы находящихся на руде микроорганизмов проводили в элективной среде для кислотолюбивых хемолитотрофных бактерий 9К (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidiphilium* spp. [7, 8]) с тиосульфатом натрия, обеспечивающей выход и накопление этих бактерий в жидкой фазе пульпы. Нарботку биомассы клеток микроорганизмов из руды проводили стационарно в колбах Эрленмейера (V = 250 мл), используя орбитальный шейкер-инкубатор (Biosan, марки ES-20/80) при температуре 22°C на протяжении от 2,5 до 6,5 суток. Соотношение измельченной руды к элективной питательной среде составляло 1:8.

Лабораторная установка. Исследования кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания металлов при обработке ультразвуком твердой фазы рудной пульпы проводились на смонтированной лабораторной установке [9]. Установка включает камеру обработки рудной пульпы, камеру водяного охлаждения, генератор ультразвуковых колебаний [10–12], перистальтические насосы и измеритель температуры марки ИРТ-4/16.

Эксперимент

Перед началом эксперимента элективную питательную среду объемом 720 мл фильтровали через двойной обеззоленный фильтр «Белая лента» (D = 11 см) и обрабатывали ультрафиолетом в течение 1 часа. Приготовление питательной среды осуществлялось по [13]. Далее ее смешивали с из-

мельченной рудой (90 г) в соотношении 1:8 и оставляли при температуре 30°C. По истечению 2,5, 4,5, 5,5, 6,5 суток проводили отбор нулевой пробы объемом 20 мл. Ее центрифугировали при частоте вращения 1 тыс. об/мин на протяжении 10 минут, разделяя пульпу на жидкую и твердую фазы и обеспечение концентрирования клеток кислотолюбивых хемолитотрофных бактерий в жидкой части пульпы. Жидкую часть использовали для определения pH, Eh и биомассы кл/мл ($N_{кл}$). Оставшуюся смесь питательной среды и измельченной руды (≈ 790 мл) помещали в мерную емкость установки. После включения перистальтических насосов, которые заполняли пульпой камеру ультразвуковой обработки, осуществлялась подача охлаждающей воды в камеру охлаждения и включение генератора ультразвуковых колебаний.

Для эксперимента были выбраны интенсивности колебаний 4,0, 7,2, 11,0, 21,0 Вт/см² при частоте 22 кГц. Ультразвуковая обработка в проточной камере проводилась в течение 30 минут. Через 1, 3, 10, 15 и 30 минут осуществляли отбор проб объемом 20 мл, затем пробу центрифугировали при 1 тыс. об/мин на протяжении 10 минут и определяли pH, Eh и $N_{кл}$. Центрифугирование проб проводили в центрифуге лабораторной марки ElmiCM-6M. Определение pH, Eh осуществлялось на pH-метре/ионометре Mettler-Toledo Seven Compact S220 (погрешность pH $\pm 0,002$, Eh $\pm 0,2$ мВ). Определение $N_{кл}$ в жидкой фазе пульпы проводили методом прямого подсчета клеток при помощи камеры Горяева.

Результаты исследований, обсуждение результатов

Исследования показали, что ультразвуковое воздействие оказывает влияние назначения pH и Eh рудной пульпы, что подтверждается исследованиями [14–15]. В процессе ультразвуковой обработки в рудных пульпах кавитация вызывает образование свободных радикалов OH^- и H^+ , которые вступают в реакции с минералами пульпы [16–18]. Образующиеся гидроксильный, $\cdot OH$ и водородный, H радикалы могут вступать во вторичные реакции. Как показал анализ публикаций, при ультразвуковой обработке значения pH рудных пульп растут до 7,9%, значения Eh падают, что объясняется эффектом образования гидроксильных радикалов и H^+ -ионов [2, 19].

Как показал эксперимент, на значения pH и Eh также влияет изменение количества клеток микроорганизмов, что подтверждается исследованиями [20]. При возрастании $N_{кл}$ значение pH увеличивается, при этом значение Eh падает. Соответственно, при снижении числа микроорганизмов pH уменьшается, а значение Eh возрастает.

Результаты исследования представлены на рисунках 1–3.

Возрастание $N_{кл}$ при ультразвуковой обработке с интенсивностью 4,2, 7,2 Вт/см² в первые 60 секунд можно объяснить сбиванием с частиц сульфидной руды хемолитотрофных микроорганизмов, т.е. частичным разрушением бактериальной пленки (рис. 3).

Дальнейшее снижение числа планктонных клеток в следующие 120 секунд обработки свидетельствует об частичном ингибировании и инактивации. В следующие 420 секунд процесса (интенсивность – 4,2 Вт/см²) и 120 секунд процесса (7,2 Вт/см²) фиксировалось увеличение числа клеток, что объясняется полным разрушением бактериальной пленки и частичным разрушением частиц руды.

Далее, в течение 1200 секунд процесса фиксировался процесс ингибирования и резкого снижения числа клеток микроорганизмов. При интенсивности излучения 4,2 Вт/см² и продолжительности процесса 1 800 секунд численность

планктонных бактерий выросла 2,33 раза, однако при 7,2 Вт/см² численность бактерий снизилась на 10 %.

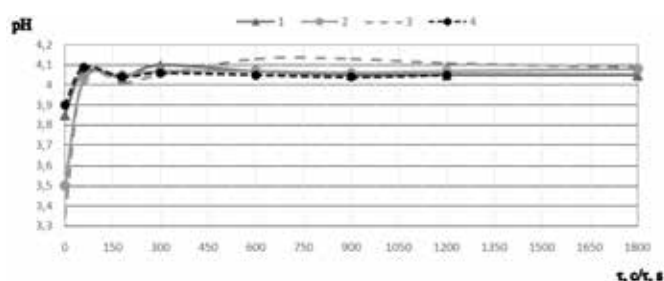


Рис. 1. Изменение значения pH при ультразвуковом воздействии на рудную пульпу с питательной средой для микроорганизмов: 1–4,0 Вт/см²; 2–7,2 Вт/см²; 3–11,0 Вт/см²; 4–21,0 Вт/см²

Fig. 1. Change in pH value when exposed to ultrasonic influence on ore pulp with a nutrient medium for microorganisms: 1–4.0 W/cm²; 2–7.2 W/cm²; 3–11.0 W/cm²; 4–21.0 W/cm²

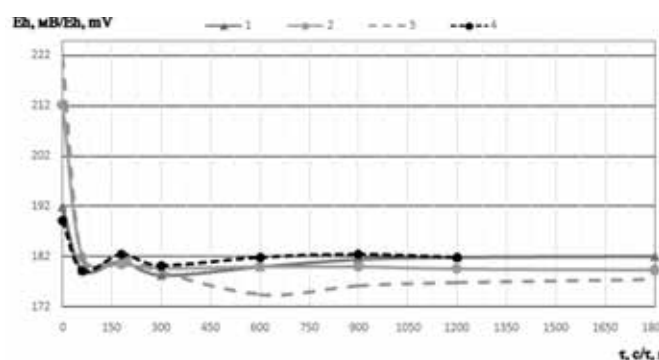


Рис. 2. Изменение значения Eh при ультразвуковом воздействии на рудную пульпу с питательной средой для микроорганизмов: 1–4,0 Вт/см²; 2–7,2 Вт/см²; 3–11,0 Вт/см²; 4–21,0 Вт/см²

Fig. 2. Change in the value of Eh when exposed to ultrasonic influence on ore pulp with a nutrient medium for microorganisms: 1–4.0 W/cm²; 2–7.2 W/cm²; 3–11.0 W/cm²; 4–21.0 W/cm²

При интенсивностях 11 и 21 Вт/см² в первые 60 секунд процесса ультразвуковой обработки наблюдалась, как и при интенсивностях 4,2, 7,2 Вт/см², возрастание числа планктонных микроорганизмов происходило в 1,25–2 раза, что также можно объяснить сбиванием с частиц сульфидной руды sessильных микроорганизмов и разрушением бактериальных пленок, однако далее происходило снижение числа планктонных клеток до окончания ультразвукового воздействия.

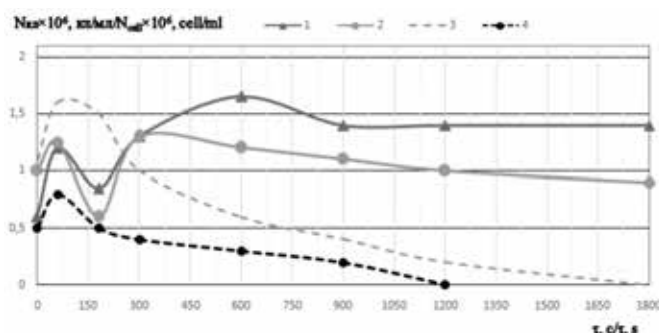
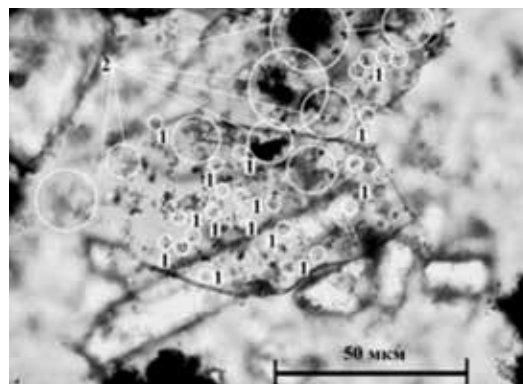


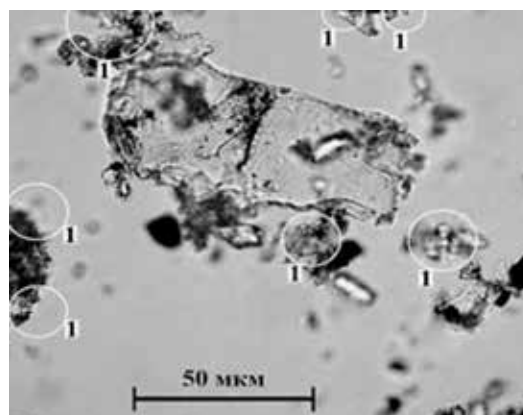
Рис. 3. Изменение количества клеток хемолитотрофных микроорганизмов в рудной пульпе при ультразвуковом воздействии: 1–4,0 Вт/см²; 2–7,2 Вт/см²; 3–11,0 Вт/см²; 4–21,0 Вт/см²

Fig. 3. Change in the number of cells of chemolithotrophic microorganisms in the ore pulp under the ultrasonic influence: 1–4.0 W/cm²; 2–7.2 W/cm²; 3–11.0 W/cm²; 4–21.0 W/cm²

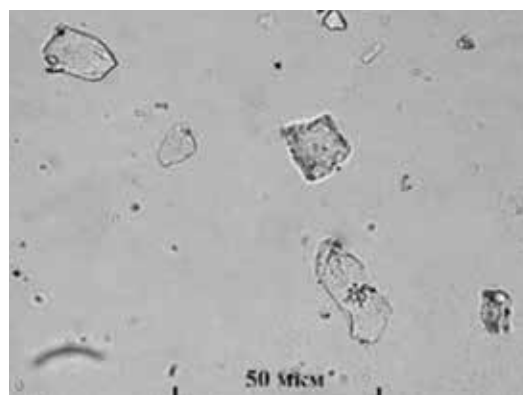
При интенсивности 11,0 Вт/см² резкое снижение численности бактерий до нуля наступала через 1 800 секунд процесса ультразвуковой обработки, а при 21,0 Вт/см²—через 1 200 секунд. Это подтвердили микроскопические исследования на тринокулярном микроскопе марки «Микромед 3 (вар. 3 LED М)» с видеоокулярном марки «TourCam UCMOS05100KPA», приведенные на рисунке 4.



а (а)



б (b)



в (c)

Рис. 4. Микрофотография рудной пульпы, биопленок и хемолитотрофных микроорганизмов: а) до ультразвуковой обработки, 1 – хемолитотрофные микроорганизмы; 2 – биопленки; б) после ультразвуковой обработки при интенсивности 11 Вт/см², продолжительности 1 800 с, 1 – биопленки; в) после ультразвуковой обработки при интенсивности 21 Вт/см², продолжительности 1200 с

Fig. 4. Microphotograph of ore pulp, biofilms and chemolithotrophic microorganisms: а) before ultrasonic treatment, 1 – chemolithotrophic microorganisms; 2 – biofilms; б) after ultrasonic treatment at an intensity of 11 W/cm², duration 1800 s, 1 – biofilms; с) after ultrasonic treatment at an intensity of 21 W/cm², duration 1200 s

На основании результатов исследований можно сделать вывод, что для повышения кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания необходимо воздействовать ультразвуком на рудную пульпу, а только потом смешивать обработанную пульпу с бактериальной суспензией.

Заключение

Как показывает анализ литературных источников, ультразвуковая обработка интенсивностью более 20 Вт/см² твердой фазы рудной пульпы в течение 15–20 минут обеспечивает очистку поверхности кристаллических фаз от оксидных пленок, что интенсифицирует процесс бактериально-химического выщелачивания. Как показали проведенные экспе-

рименты, ультразвуковое воздействие при интенсивности от 21 Вт/см² и выше, продолжительности процесса более 1200 секунд, частоте колебаний 22 кГц инактивирует микроорганизмы, что снижает кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания. Из этого следует, что для повышения кинетики процесса целесообразно отдельно воздействовать ультразвуком на рудную пульпу, а затем смешивать ее с бактериальной суспензией для проведения процесса бактериально-химического выщелачивания.

Воздействие ультразвука представляет большой интерес для дальнейшего изучения. Необходимо более детально выявить механизмы ультразвукового воздействия как на минеральные частицы пульпы, так и на жизнедеятельность хемолитотрофных микроорганизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Блайда ИА, Васильева ТВ. Влияние ультразвука на процессы биовыщелачивания металлов и десульфуризации углей. *Микробиология и биотехнология*. 2017;(4):6–20. [Blajda IA, Vasil'eva TV. The influence of ultrasound on the processes of bioleaching of metals and desulfurization of coals. *Microbiology and biotechnology*. 2017;(4):6–20 (In Russ.)].
2. Глембоцкий ВА, Соколов МА, Якубович ИА. [и др.] Ультразвук в обогащении полезных ископаемых. Алма-Ата: Наука, 1972. 229 с. [Glembockij VA, Sokolov Ma, Yasybovich, et al. Ultrasound in mineral processing. Alma-Ata, 1972 (In Russ.)].
3. Гроо ЕА., Алгебраистова НК, Жижаев АМ. [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 EA, Algebraistova NK, Zhizhaev AM, et al. Study of the influence of ultrasonic treatment to intensify the processes of extracting gold from difficult-to-process raw materials. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;(2):89–96 (In Russ.)].
4. Хмельов ВН, Сливин АН, Барсуков РВ. [и др.] Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Алт. Гос. Техн. ун-т, БТИ. Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 196 с. [Hmelyov VN, Slivin AN, Barsukov RV, et al. Application of high-intensity ultrasound in industry. Bijsk, 2010 (In Russ.)].
5. Очеретяна С. О. Краткий обзор влияния ультразвука на инактивацию микроорганизмов участвующих в биовыщелачивании металлов (влияние ультразвука на удаление биопленки). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;19:230–236. [Ocheretyana SO. A brief review of the influence of ultrasound on the inactivation of microorganisms involved in the bioleaching of metals (the effect of ultrasound on the removal of biofilm). *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;19:230–6 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_230.
6. Hajnasova TS, Truhin YuP. Bioleaching of a sulphide cobalt-copper-nickel ore in a continuous reactor system. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;46:167–85 (In Russ.)].
7. Хайнасова ТС. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды с применением стандартной и модифицированной сред 9К. *Успехи современного естествознания*. 2019;(12):175–180. [Hajnasova TS. Bioleaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore using standard and modified 9K media. *Advances in modern natural science*. 2019;(12):175–80 (In Russ.)]. DOI: 10.17513/use.37286.
8. Хайнасова ТС, Пашкевич РИ. Таксономический анализ культуры ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, принимающей участие в биовыщелачивании сульфидной руды месторождения Шануч. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019;(10):28–33. [Hajnasova TS, Pashkevich RI. Taxonomic analysis of the culture of acidophilic chemolithotrophic microorganisms taking part in the bioleaching of sulfide ore from the Shanuch deposit. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019;(10):28–33 (In Russ.)]. DOI: 10.17513/mjpf.12862.
9. Иодис ВА. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023;(12):81–87. [Iodis VA. Laboratory reactor for ultrasonic treatment of cobalt-copper-nickel ore pulp. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):81–7 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2023.12.13.
10. Хмелев ВН. Ультразвуковые аппараты для интенсификации процессов. *Труды Всероссийской акустической конференции: мат-лы III Всерос. конф. М., 2020. С. 191–194.* [Hmelev VN. Ultrasonic devices for process intensification. *Proceedings of the All-Russian Acoustic Conference: materials of the III All-Russian Conference*. 2020:191–94 (In Russ.)].
11. Хмелев ВН, Барсуков РВ, Барсуков АР. [и др.] Ультразвуковой технологический аппарат с пятью рабочими инструментами различного диаметра для проведения научных исследований. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2022;4(44):106–109. [Hmelyov VN, Barsukov RV, Barsukov AR, et al. Ultrasonic technological apparatus with five working instruments of various diameters for scientific research. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2022;4(44):106–9 (In Russ.)]. DOI: 10.25699/SSSB.2022.44.4.003.

12. Иодис В. А. Разработка системы контроля параметров рудной пульпы в процессе ультразвуковой обработки. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2023;29(3):45–55. [Iodis VA. Development of a system for monitoring the parameters of ore pulp in the process of ultrasonic processing. *Bulletin of the Transbaikalian State University*. 2023;29(3):45–55 (In Russ.)]. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-45-55.
13. Очеретяна СО. Влияние pH и аэрации на смешанную культуру хемолитотрофных ацидофильных бактерий. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2022;10:246–255. [Ocheretyana SO. The influence of pH and aeration on a mixed culture of chemolithotrophic acidophilic bacteria. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022;12:246–55 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_10_246.
14. Викулин ПД, Викулина ВБ. Влияние ультразвука на изменение pH воды. *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019;4(80):3–8. [Vikulin PD, Vikulina VB. The influence of ultrasound on the change in pH of water. *Water and ecology: problems and solutions*. 2019;4(80):3–8 (In Russ.)]. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.3-8.
15. Kang W, Xun H, Kong X, et al. Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation. *Mining Science and Technology*. 2009;19:498–507.
16. Mao Y, Xia W, Peng Y et al. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. *Fuel Processing Technology*. 2019;195:106150. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106150.
17. Ambedkar B, Nagarajan R, Jayanti S. Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18(3):718–26. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.09.006.
18. Saikia BK, Dutta AM, Saikia L, et al. Ultrasonic assisted cleaning of high sulphur Indian coals in water and mixed alkali. *Fuel Processing Technology*. 2013;123:107–13. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.01.037.
19. 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>.
20. Киореску АВ. Воздействие периодического ультразвукового облучения на окисление серы смешанной культурой ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;12:25–32. [Kioresku AV. The effect of periodic ultrasonic irradiation on the oxidation of sulfur by a mixed culture of acidophilic chemolithotrophic microorganisms. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;12:25–32 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-25-32.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Иодис Валентин Алексеевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>, ResearcherID AEF-2566-2022, Scopus Author ID — 58790763900, e-mail: iodisva@mail.ru

Valentin A. Iodis — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>, ResearcherID AEF-2566-2022, Scopus Author ID — 58790763900, e-mail: iodisva@mail.ru



Очеретяна Светлана Олеговна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, <https://orcid.org/0009-0008-6221-8239>, e-mail: blossom-so@yandex.ru

Svetlana O. Ocheretyana — Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-6221-8239>, e-mail: blossom-so@yandex.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare equal contribution from everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

КАСКАДНАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД

Р. С. Вопилин, В. А. Иодис

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук»
(НИГТЦ ДВО РАН), гПетропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация: В целях интенсификации процесса бактериально-химического выщелачивания руд проанализированы основные виды и конструктивные особенности реакторов, реакторных установок для осуществления данного процесса. Проанализированы существующие системы плавного регулирования потока пульпы, аэрации, термостатирования, контроля и автоматического регулирования параметров реакторов. На основании анализа их преимуществ и недостатков спроектирована и смонтирована каскадная реакторная установка проточного типа. Для установки разработана система регулирования параметров процесса выщелачивания – температуры, водородного показателя, смеси пульпы и бактериальной суспензии, частоты перемешивания смеси, система аэрации, термостатирования.

Ключевые слова: бактериально-химическое выщелачивание, рудная пульпа, бактериальная суспензия, реактор, реакторная установка

Для цитирования: Вопилин Р. С., Иодис В. А. Каскадная реакторная установка для бактериально-химического выщелачивания руд. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 49-54. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54.

CASCADE REACTOR PLANT FOR BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING ORE

R. S. Vopilin, V. A. Iodis

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

Abstract: In order to intensify the kinetics of the bacterial-chemical leaching process ore, the main types and design features of reactors and reactor installations for implementing this process were analyzed. The existing systems for smooth regulation of pulp flow, aeration, thermostating, control and automatic regulation of reactor parameters are analyzed. Based on an analysis of their advantages and disadvantages, a flow-type cascade reactor plant was designed and installed. For the installation, a system has been developed to regulate the parameters of the leaching process - temperature, pH of the mixture of pulp and bacterial suspension, frequency of mixing the mixture, aeration system, thermostating.

Keywords: bacterial-chemical leaching, ore pulp, bacterial suspension, reactor, reactor plant

For citation: Vopilin R. S., Iodis V. A. Cascade reactor plant for bacterial-chemical leaching ore. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):49-54. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54.

Введение

Бактериально-химическое выщелачивание (БХВ) металлов представляет собой перспективную технологию гидрометаллургической переработки и обогащения рудного сырья благодаря простоте организации и снижению вредного воздействия на окружающую среду. Различают кучное, подземное и реакторное выщелачивание. Реакторное бактериально-химическое выщелачивание руд начали использовать еще в XX веке с целью окисления сульфидов ценных металлов, например Ni, Cu, Co, до сульфатов в отдельных реакторах или реакторных установках.

Выщелачивание при использовании реакторных установок в сравнении с кучным или подземным выщелачиванием требует существенных капитальных и больших эксплуатационных затрат. Снижение данных затрат возможно путем интенсификации кинетики самого процесса и автоматизации установок. К контролю и регулированию параметров (автоматизации) относится система регулирования температуры, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала смеси измельченной руды, воды (пульпы) и бактериальной суспензии, а также частоты перемешивания смеси, объемного расхода воздуха (аэрации).

Цель работы: разработка каскадной реакторной установки для бактериально-химического выщелачивания руд на основании анализа конструкций реакторных установок и реакторов.

Материал и методы исследований

Обзор и анализ конструкций существующих реакторов и реакторных установок.

Бактериально-химические реакторы

Известна конструкция реактора (рис. 1) для БХВ тиобактериями пирит-пирготитовой фракции, где для насыщения кислородом смеси бактериальной суспензии и измельченной руды + воды (пульпа) применена труба Вентури [1].

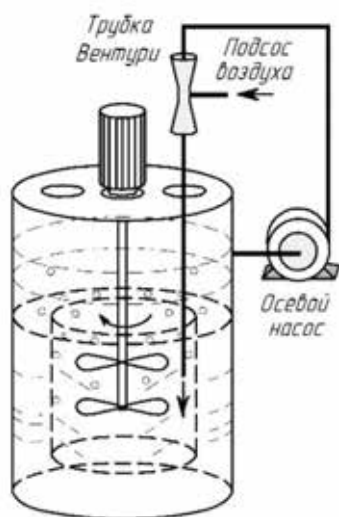


Рис. 1. Схема реактора для бактериально-химического выщелачивания тиобактериями пирит-пирготитовой фракции

Fig. 1. Schema of the reactor for biochemical treatment of thiobacteria of the pyrite-pyrgotite fraction

При прохождении смесью суспензии и пульпы трубы Вентури в момент ее замкнутой циркуляции, обеспечиваемой осевым насосом, происходит подсос воздуха, который вместе с пульпой направляется в реактор под уровень жидкости. Подача обогащенной воздухом пульпы происходит над механической мешалкой и обеспечивает ее циркуляцию через низ реактора в верхнюю его часть и далее к насосу.

Недостатками данного реактора являются неравномерность насыщения кислородом смеси бактериальной суспензии и пульпы, отсутствие в реакторе автоматической системы поддержания температуры (система термостатирования), системы контроля и автоматического регулирования параметров процесса, отсутствие подачи CO_2 и конденсатотводчика (системы улавливания испарений).

К преимуществам можно отнести простоту конструкции системы насыщения кислородом жидкости реактора.

Обеспечение равномерной подачи и обогащение смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии (термофильные бактерии типа *Acidianus brierleyi* и *Metallosphaera sedula*) O_2 и CO_2 решена в реакторе (рис. 2) [2], где данные газы подаются снизу реактора через распылительную трубку.

Рабочее давление реактора варьируется от 137 882 до 206 812 Па. В нем полностью автоматизирован данный процесс. Реактор емкостью 200 л имеет механическую систему

перемешивания, систему подогрева, расположенную внутри и снаружи по корпусу реактора. Контроль концентраций O_2 и CO_2 осуществляется как в пульпе, так и над ее свободной поверхностью.

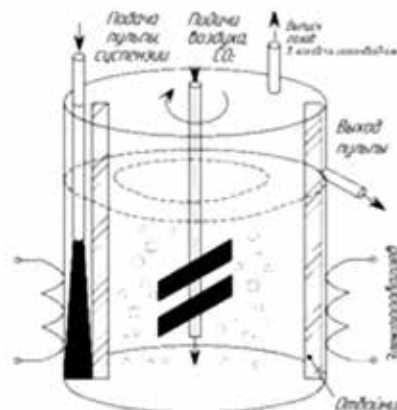


Рис. 2. Схема реактора для обогащения смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии

Fig. 2. Schema of a reactor for enriching a mixture of ore pulp and bacterial suspension

Установка [2] позволяет повысить кинетику процесса БХВ за счет равномерной подачи и автоматизации процесса обогащения смеси O_2 и CO_2 , однако не термостатирована.

Известен реактор для БХВ сульфидных минералов [3] при температурах от 40 до 50 °С, в котором насыщение пульпы кислородом воздуха (21 об.%), углекислым газом (от 0,5 до 5 %) осуществлялось из отверстия в валу механической мешалки.

Реактор имел корпус из нержавеющей стали, отбойники для турбулизации потока перемешиваемой смеси пульпы и бактериальной суспензии (бактерии – *Acidithiobacillus*, *Thiobacillus*, *Leptospnillum*, *Ferromicrobium* и *Acidiphilium*), ТЭНы, патрубки подачи пульпы в реактор и выпуска газов. Реактор может быть снабжен датчиками контроля параметров, способен очищать выходящие газы. К недостаткам изобретения [3] можно отнести сложность организации процесса аэрации через отверстия в валу механической мешалки, низкую степень аэрации пульпы кислородом воздуха ввиду низкой производительности аэратора, а также отсутствие системы термостатирования.

Большинство вышеуказанных недостатков устранено в конструкции реактора для БХВ сульфидов металлов Zn, Cu, Ag, Ni, Co, Mn [4]. Измельченная сульфидная руда смешивается с бактериальной суспензией непосредственно в реакторе при перемешивании механической мешалкой. Далее в смесь начинает подаваться воздух через специальные аэрационные блоки реактора, имеющие возможность перемещения вдоль корпуса реактора. В конструкции предусмотрена система термостатирования в виде нагревательного элемента и воздушного охлаждения. Для контроля параметров процесса БХВ предусмотрен блок управления и терморегуляции. Для поддержания и регулирования значения pH среды пульпы, а также подачи реагентов модификаторов предусмотрен насос-дозатор.

Недостатком данного реактора [4] является сложность удаления пустой породы со дна реактора, отсутствие системы улавливания испарений реактора и обогащения воздуха углекислым газом.

Практически не имеет недостатков конструкция реактора для выщелачивания сульфидной руды, содержащей Ni, Co, Cu. Реактор, представленный на рисунке 3, имел системы механического перемешивания пульпы, аэрации пульпы, термостатирования и систему управления с возможностью сбора, регистрации, регулирования показателей процесса и возможностью контроля над процессом.

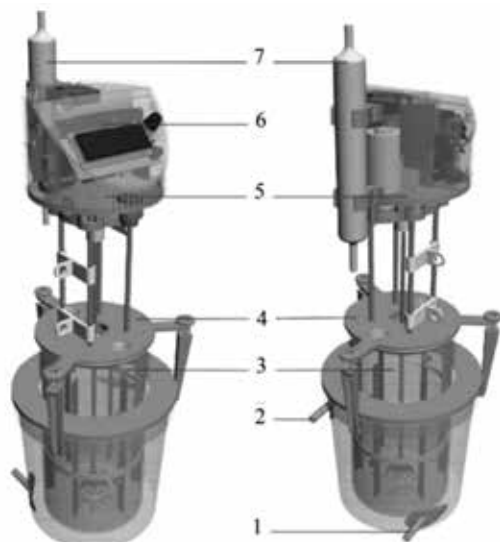


Рис. 3. Реактор для выщелачивания сульфидной руды [5]: 1 – подача тепло/хладоносителя; 2 – отвод тепло/хладоносителя; 3 – рабочий объем; 4 – крышка; 5 – станина крепления системы контроля и регулирования параметров процесса; 6 – дисплей; 7 – конденсатотводчик
Fig. 3. Reactor for leaching sulfide ore [5]: 1 – heat/coolant supply; 2 – heat/coolant removal; 3 – working volume; 4 – cover; 5 – frame for fastening the system for monitoring and regulating process parameters; 6 – display; 7 – condensate drain

Бактериально-химические реакторные установки

Известна реакторная установка каскадного типа герметизированных реакторов с пневмомеханическим перемешиванием, перемещением смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии по реакторам установки посредством подачи воздуха в нижнюю часть каждого из 3–5 реакторов (1-й контактный чан) и образования в них избыточного давления [6].

К преимуществам данной установки можно отнести возможность плавного регулирования скорости потока пульпы без использования насосов, а к недостаткам – отсутствие системы термостатирования, системы автоматического регулирования параметров процесса БХВ, системы улавливания и отвода испарений.

Выявленные недостатки реакторной установки [6] частично учтены при создании проточной каскадной установки для БХВ халькопиритового концентрата с электрохимическим контролем окислительно-восстановительного потенциала [7].

Принципиальная схема показана на рисунке 4.

Процесс выщелачивания осуществлялся в четырех реакторах, первый из которых выполнял роль контактного чана при проточке смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии по каскаду реакторов самотеком. В реакторах обеспечивалась аэрация воздухом, обогащенным углекислым газом ($\approx 2\%$). Однако в данной установке также отсутствует система термостатирования (охлаждения/нагрева пульпы), как и в установках [8, 9].

Установка [8] предназначалась для БХВ арсенопиритовых руд и включала три реактора и контактный чан для приготовления смеси пульпы и бактериальной суспензии. Реакторы снабжены отбойниками для турбулизации потока перемешиваемой смеси пульпы и бактериальной суспензии,

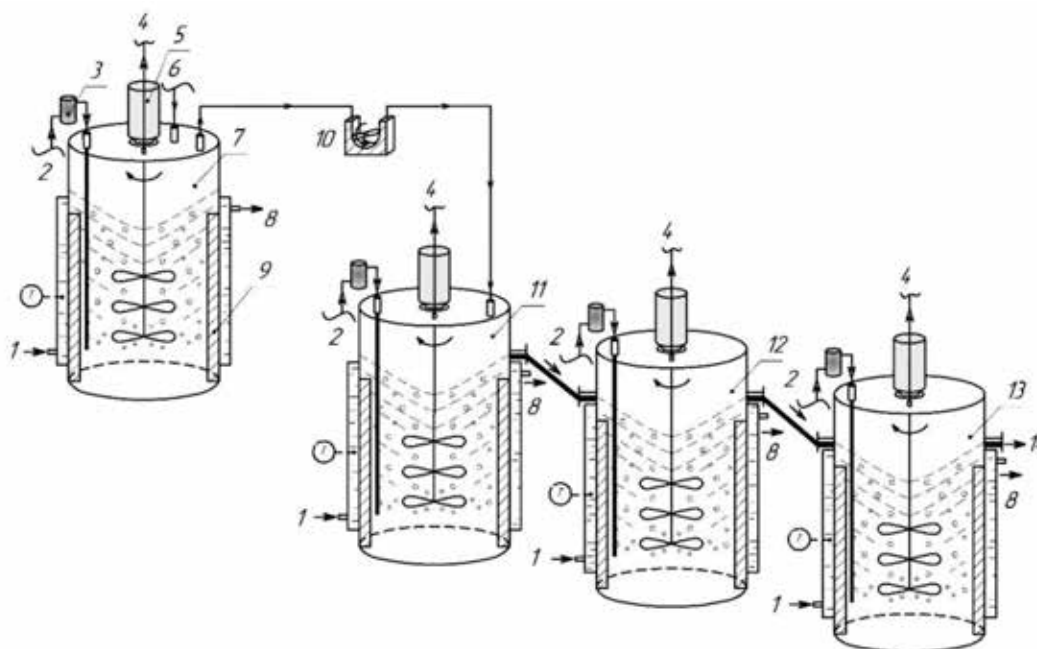


Рис. 4. Схема установки бактериально-химического выщелачивания арсенопиритовых руд [8]: 1 – подача воды в рубашки реакторов; 2 – подача воздуха; 3 – ротаметр; 4 – выход паров в конденсатотводчик; 5 – система перемешивания; 6 – загрузка руды, воды, бактериальной суспензии; 7 – чан для смешивания пульпы и бактериальной суспензии; 8 – выход воды из рубашки реакторов; 9 – отбойники; 10 – перистальтический насос; 11, 12, 13 – реакторы 1–3; 14 – подача продуктивного раствора на сорбцию
Fig. 4. Schema of the installation of water treatment for arsenopyrite ores [8]: 1 – water supply to reactor jackets; 2 – air supply; 3 – rotameter; 4 – vapor release into the condensate trap; 5 – mixing system; 6 – loading of ore, water, bacterial suspension; 7 – vat for mixing pulp and bacterial suspension; 8 – water outlet from the reactor jacket; 9 – bumpers; 10 – peristaltic pump; 11, 12, 13 – reactors 1–3; 14 – supply of productive solution for sorption

но отсутствуют приборы измерения/контроля pH, Eh, температуры процесса выщелачивания.

Реакторной установкой, лишенной недостатков, по мнению авторов, является установка проточного типа для БХВ пиритового концентрата, состоящая из четырех резервуаров из нержавеющей стали марки 304-L, выставленных в каскад [10]. Первый резервуар имел емкость 50 л, остальные — по 20 л. Процесс проходил при следующих параметрах продолжительности, аэрации и частоты перемешивания пульпы: для первого реактора — 3 дня, 2000 л/ч, 350 об/мин, для остальных — 1,3 дня, 900, 700 и 500 л/ч, 390 об/мин.

Установка имела возможность плавно регулировать скорость потока пульпы, была оснащена системой термостатирования (циркуляция холодной воды и электрическая система нагрева), системой улавливания и отвода испарений, механической системой перемешивания и системой аэрации воздухом, обогащенным CO₂.

Результаты анализа конструкций реакторных установок и реакторов для БХВ руд с указанием их преимуществ и недостатков представлены в таблице.

Таблица / Table

Результаты анализа конструкций реакторных установок и реакторов
Results of the analysis of reactor plant and reactor designs

Источник / Source	Наличие / Availability				
	системы термостатирования / Thermostating systems	системы контроля и автоматического регулирования параметров / Monitoring and automatic parameter control systems	системы улавливания испарений / Vapor capture systems	плавного регулирования потока / Smooth flow control	аэрации воздухом, обогащенным CO ₂ / Aeration with CO ₂ -enriched air
[1]	–	–	–	–	+/-
[2]	+/-	+	+	–	+
[3]	–	+	+	–	+/-
[4]	+	+	–	–	+/-
[5]	+	+	+	–	+/-
[6]	–	–	–	+	–
[7]	–	+	+	+	+
[8–9]	–	–	+	+	+
[10]	+	+	+	+	+

Разработка каскадной реакторной установки

С учетом преимуществ и недостатков конструкций рассмотренных бактериально-химических реакторов и реакторных установок в НИГТЦ ДВО РАН была разработана, смонтирована каскадная реакторная установка проточного типа для БХВ.

Схема разработанной реакторной установки представлена на рисунке 5.

Реакторы, выполненные из нержавеющей стали, рабочим объемом 18 л каждый, крепятся на станинах, образуя каскад для обеспечения непрерывного проточного процесса БХВ. Снабжены мешалками с аксиальным потоком среды, патрубками подвода и отвода воды для термостатирования реакторов, воздуха и углекислого газа, отбойниками

для турбулизации перемешиваемой смеси рудной пульпы (4,32–4,79 % Ni; 0,61–0,75 % Cu; 0,094–0,12 % Co) и бактериальной суспензии (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidiphilium spp.*), патрубками для крепления контрольно-измерительной аппаратуры и сброса пульпы с пустой породой после завершения процесса. Оптимальное соотношение в смеси пульпы и суспензии твердой фазы к жидкой — 1 к 5 [11].

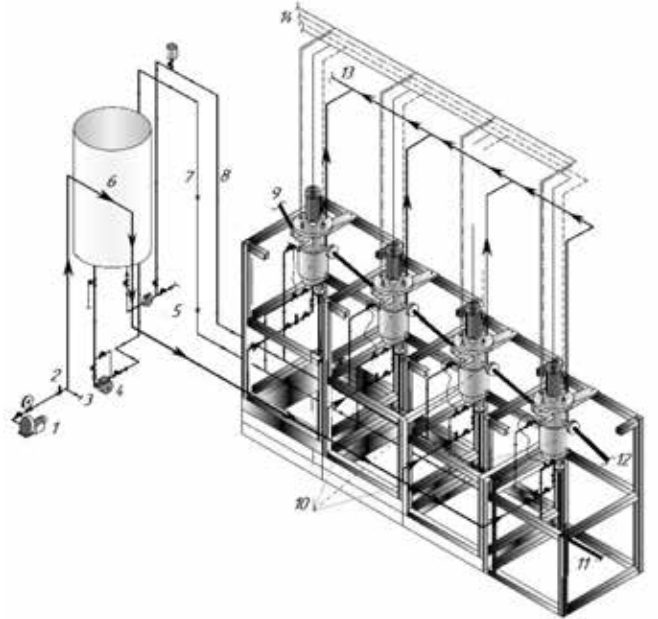


Рис. 5. Схема разработанной реакторной установки:

1 – вихревой компрессор Hailea Vortex Blower VB – 125G; 2 – регулятор расхода воздуха; 3 – подача углекислого газа; 4 – центробежный водяной насос Oasis CR 25/4; 5 – расходомер водяной; 6 – водонагреватель Thermex Omnia 100 V; 7, 8 – подача, отвод воды для термостатирования реакторов; 9 – загрузка микродозатором руды и бактериальной суспензии; 10 – реакторы; 11 – сброс пустой породы; 12 – подача продуктивного раствора на дальнейшую экстракцию; 13 – сброс воздуха, испарений в вытяжную вентиляцию; 14 – регулирование температуры 4 термометрами сопротивления ОВЕН ДТС174-50 М от 3 ПИД-регуляторов, тахометр и частотный преобразователь, датчик pH среды, датчик уровня

Использование мешалок с аксиальным потоком среды может обеспечить более высокий коэффициент массообмена при одинаковом крутящем моменте и потреблении энергии [12]. Проточное прохождение смесью рудной пульпы и бактериальной суспензии первого – четвертого реакторов происходит самотеком с плавным регулированием потока пульпы при периодической загрузке измельченной руды с использованием микродозатора марки MBW 042. Для увеличения кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания, а именно снятия большего количества оксидных пленок с поверхности сульфидных минералов, смесь измельченной руды и дистиллированной воды (рудная пульпа) подвергается ультразвуковому воздействию с частотой 22 кГц, интенсивностью от 17 до 28 Вт/см² [13, 14].

Насыщение кислородом смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии обеспечивается вихревым компрессором марки *Hailea Vortex Blower VB – 125G* (безмасляная технология «Non-Oil»), максимальный расход – 250 л/мин). Компрессор подает воздух через кольцевые барботеры в нижнюю часть реакторов, а удаление воздуха производится из верхней их части в вытяжную вентиляцию. Предусмотрена подача углекислого газа на линии подачи воздуха для его обогащения CO₂ от углекислотного баллона емкостью 40 л.

Термостатирование обеспечивается электрическим водонагревателем марки *Thermex Omnia 100 V* и циркуляционным насосом марки *Oasis CR 25/4*. *Thermex Omnia 100 V* имеет объем 100 л, с тремя режимами электрической мощности: 800, 1200 и 2000 Вт. Система контроля и автоматического регулирования параметров состоит из блока управления с контрольно-измерительными приборами, датчики которых заведены в порты на крышках реакторов (рис. 5). Регулирование температуры (оптимальная температура для хемолитотрофных микроорганизмов – 28–32 °C) [15] осу-

ществляется по сигналу термометров сопротивления марки *ОВЕН ДТС174-50М* на ПИД-регуляторы, которые регулируют подачу электромагнитных клапанов линий подачи воды в рубашки реакторов.

Заключение

Анализ существующих реакторных установок и реакторов показал, что их конструкции мало отличаются друг от друга. Основное различие состоит в том, имеются или нет системы термостатирования, контроля и автоматического регулирования параметров процесса БХВ. Во всех рассмотренных установках и устройствах не предусмотрено удаление пустой породы из реакторов по окончании процесса БХВ.

В целях повышения скорости БХВ рассчитана, смонтирована каскадная реакторная установка для выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд. В установке предусмотрены системы плавного регулирования потока пульпы, аэрации, термостатирования, контроля и автоматического регулирования параметров процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баттергем Р.Д., Хоффманн А.В., Катсикарус Н. Патент РФ № 93051551/12, 02.12.1992. Реактор. Патент России № 2139131. 1999. [Battergem R.D., Hoffmann A.V., Katsikarus N. Patent RF No. 93051551/12, 02.12.1992. Reactor. Russian Patent No. 2139131. 1999. (In Russ.)].
2. Romero-Miranda J. A. Patent WO № PCT/IB20 12/002044, 12.10.2012. Bioreactor for bioleaching with aeration and air diffusion system. Patent international № 2013057557. 2013.
3. Romero-Miranda J. A. Patent FI № 20020427, 06.03.2002. Biological leaching of sulfide minerals. Patent Finland № 122564. 2012.
4. Мязин В.П., Баранов В.В., Соболев А.В. Патент РФ № 2017147088, 29.12.2017. Ферментер для бактериального окисления сульфидных руд и концентратов. Патент России № 179139. 2018 г., Бюл. №13. [Myazin V.P., Baranov V.V., Sobolev A.V. Patent RF No. 2017147088, 12/29/2017. Fermenter for bacterial oxidation of sulfide ores and concentrates. Russian Patent No. 179139. 2018, Bull. No. 13. (In Russ.)].
5. Балыков АА, Левенец ОО, Хайнасова ТС. Проточный биореактор для исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд и концентратов. *Записки Горного института*. 2018;232:383–387. [Balykov AA, Levenets OO, Khaynasova TS. Flow bioreactor for studying bacterial-chemical leaching of sulfide copper-nickel ores and concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2018;232:383-87 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.383.
6. Каравайко ГИ, Росси Дж, Агате А. [и др.]. Биоготехнология металлов: практическое руководство. М., 1989. 374 с. [Karavayko GI, Rossi J, Agate A, et al. Biogeotechnology of metals. Practical guide. Moscow, 1989 (In Russ.)].
7. Lotfalian M, Ranjbar M, Fazelipour MH, et al. The effect of redox control on the continuous bioleaching of chalcopyrite concentrate. *Minerals Engineering*. 2015;81:52-7. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.07.006.
8. Borja D, Nguyen KA, Silva RA, et al. Continuous bioleaching of arsenopyrite from mine tailings using an adapted mesophilic microbial culture. *Hydrometallurgy*. 2019;187:187-94. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.05.022.
9. Weston JM. Continuous biological leaching of copper from a chalcocite ore and concentrate in a saline environment: A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. The University of British Columbia, 1995.
10. d'Hugues P, Joulain C, Spolaore P, et al. Continuous bioleaching of a pyrite concentrate in stirred reactors: population dynamics and exopolysaccharide production vs. bioleaching performance. *Hydrometallurgy*. 2008;94:34-41. DOI:10.1016/j.hydromet.2008.05.045.
11. Левенец ОО. Биореакторы для биовыщелачивания сульфидных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018;(S57):176–184. [Levenets OO. Bioreactors for bioleaching of sulfide ores. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018;(S57):176-84 (In Russ.)].
12. Хайнасова ТС. Реакторы с механическим перемешиванием в бактериально-химическом выщелачивании. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;(S46):211–224. [Khaynasova TS. Reactors with mechanical stirring in bacterial-chemical leaching. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;S46:211-24 (In Russ.)].

13. Иодис ВА. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023;(12):81–87. [Iodis VA. Laboratory reactor for ultrasonic treatment of cobalt-copper-nickel ore pulp. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):81-7 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2023.12.13.
14. Iodis VA, Koydan IA. Investigation of oxide films removal process from the ore pulp particle surface during its ultrasonic treatment. *Non-Ferrous Metals*. 2024;(1):8-12. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.02.
15. Киореску АВ, Мусихин ВО, Хомченкова АС. [и др.] Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;S63:360–365. [Kioresku AV, Musikhin VO, Khomchenkova AS, et al. Study of vat bacterial-chemical leaching of sulfide copper-nickel ores of the Shanuch deposit (Kamchatka) in flow mode. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;S63:360-5 (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вопилин Роман Сергеевич — младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, e-mail: romanvopilin1993@gmail.com



Иодис Валентин Алексеевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>, ResearcherID AEF-2566-2022, Scopus AuthorID — 58790763900, e-mail: iodisva@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Roman S. Vopilin — Junior Researcher, Scientific Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (NIGTC FEB RAS), Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: romanvopilin1993@gmail.com

Valentin A. Iodis — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>, ResearcherID AEF-2566-2022, Scopus Author ID — 58790763900, e-mail: iodisva@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Р. С. Вопилин — постановка задачи исследования, выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи; В. А. Иодис — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования / R. S. Vopilin — setting the research problem, performing work on systematizing the material, analyzing the research results and preparing data, writing the text of the article; V. A. Iodis — generation of research ideas, formulation of research problems.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ В ШЕЙКЕР-ИНКУБАТОРЕ АВТОХТОННОЙ СМЕШАННОЙ КУЛЬТУРЫ, ВЫДЕЛЕННОЙ С ОКИСЛЕННОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ

С. О. Очеретяна

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация: Ацидофильные хемолитотрофные бактерии играют важную роль в бактериально-химических технологиях переработки сульфидных руд и концентратов медно-никелевых месторождений. Они окисляют сульфиды и способствуют выщелачиванию металлов из руд. В статье представлены данные о влиянии различных пропорций смешивания руды с инокулятом и бактериальной суспензией на рост численности автохтонной смешанной бактериальной культуры, выделенной из окисленной руды медно-никелевого месторождения Шануч. В результате ПЦР-диагностики было определено, что в пробе видами-доминантами являлись *Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans* и *Sulfobacillus*.

Анализируется степень разбавления инокулята на рост численности автохтонной смешанной бактериальной культуры, выделенной из окисленной руды месторождения Шануч. Эксперименты проводились в двух вариантах загрузки: инокулят + руда и бактериальная суспензия + руда при разных соотношениях разведения твёрдого к жидкому: 1:5 и 1:8. Результаты показали, что увеличение степени разбавления (1:8) приводит к более значительному росту клеток на поздних стадиях эксперимента. Например, при варианте бактериальная суспензия + руда (1:8) количество клеток резко возросло до $133,4 \times 10^7$ кл/мл. В целом эксперименты подтверждают, что разбавление способствует росту численности бактерий на поздних этапах, что может иметь значение для оптимизации бактериально-химических технологий переработки сульфидных руд.

Ключевые слова: ацидофилы, хемолитотрофы, бактерии, месторождение Шануч, питательные среды, биомасса, планктонные формы, биовыщелачивание, бактериально-химическое выщелачивание, биогидрометаллургия

Для цитирования: Очеретяна С. О. Оптимизация питательной среды для культивирования в шейкер-инкубаторе автохтонной смешанной культуры, выделенной с окисленной руды месторождения Шануч. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 55-59. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_55_59.

OPTIMIZATION OF NUTRIENT MEDIUM FOR CULTIVATION IN A SHAKER INCUBATOR OF AN AUTOCHTHONOUS MIXED CULTURE ISOLATED FROM OXIDIZED ORE OF THE SHANUCH DEPOSIT

S. O. Ocheretyana

Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract: The article presents the results of experiments investigating the proportions of mixing ore with bacterial solutions that can be useful in the extraction of metals in hydrometallurgy. The degree of inoculum dilution on the growth of the autochthonous mixed bacterial culture isolated from the oxidized ore of the Shanuch deposit is analyzed. The experiments were carried out in two loading options: inoculum + ore and bacterial suspension + ore and at different solid to liquid ratios of 1:5 and 1:8. The results showed that an increase in the dilution degree (1:8) leads to a more significant cell growth at the later stages of the experiment. For example, with the bacterial suspension + ore (1:8) option, the cell count increased sharply to 133.4×10^7 cells/ml. In general, the experiments confirm that dilution promotes the growth of bacteria at the later stages, which may be important for the optimization of bacterial-chemical technologies for processing sulfide ores.

Keywords: acidophiles, chemolithotrophs, bacteria, Shanuch deposit, nutrient media, biomass, planktonic forms, bioleaching, bacterial-chemical leaching, biohydrometallurgy

For citation: Ocheretyana S. O. Optimization of nutrient medium for cultivation in a shaker incubator of an autochthonous mixed culture isolated from oxidized ore of the Shanuch deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):55-59. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_55_59.

Введение

Ацидофильные хемолитотрофные бактерии играют важнейшую роль в гидрометаллургии, особенно в процессах биовыщелачивания сульфидных руд [1–6]. Эти микроорганизмы способны окислять сульфиды, такие как халькопирит и пирит, а также другие соединения серы, железа и металлов, создавая кислую среду, что способствует растворению металлов [6–8]. Среди ацидофильных бактерий, используемых в биовыщелачивании, особенно важны такие виды, как *Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *A. caldus*, *Leptospirillum ferriphilum*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* и др.

Бактерии рода *Acidithiobacillus* особенно важны, так как они окисляют сульфидсодержащие руды и Fe^{2+} , а также соединения серы. Например, *A. ferrooxidans* и *A. thiooxidans* — это грамотрицательные бактерии, оптимальные условия роста которых достигаются при pH 2,0–2,5 и температуре 30–35 °C. *A. thiooxidans* наиболее активен в окислении элементарной серы, в то время как *A. ferrooxidans* может расти на восстановленных неорганических соединениях серы, используя трехвалентное железо как акцептор электронов. *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* является значимым микроорганизмом для биовыщелачивания при высоких температурах [9–17].

Состав питательной среды оказывает значительное влияние на активность и эффективность бактерий. Оптимальная питательная среда для каждого вида бактерий обеспечивает условия, необходимые для их роста и активности, что важно для успешного бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд. Исследования, направленные на оптимизацию питательных сред для культивирования автохтонных микроорганизмов, играют ключевую роль в повышении эффективности этих процессов [18, 19].

В монографии Г. И. Каравайко и др. [20] подробно описаны методы выделения и культивирования железо-, серо- и сульфидоокисляющих бактерий, а также питательные среды, обеспечивающие необходимые биогенные элементы и источники энергии. Tan и Chen [21] изучали процессы адсорбции *Acidithiobacillus ferrooxidans* на поверхности различных минералов, используя раствор K_2SO_4 и среду Сильвермана и Льюндгрена 9К.

Другие ученые, такие как Yaghoobi Moghaddam [22] и Yang [23], сосредоточили исследования на моделировании и оптимизации параметров биовыщелачивания для увеличения извлечения меди из бедных руд, используя стандартную среду 9К с добавлением железа и серной пудры в качестве источника энергии.

Цель эксперимента: оптимизация питательной среды для культивирования в шейкер-инкубаторе автохтонных ацидофильных хемолитотрофных бактерий, выделенных с окисленной руды месторождения Шануч.

Материал и методы исследования

Бактериальная культура. Для исследования выбрана автохтонная смешанная культура ацидофильных хемолитотрофных бактерий из коллекции Научно-исследовательского геотехнологического центра ДВО РАН (НИГТЦ ДВО РАН), выделенная научными сотрудниками из окисленной руды штольни кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч (Камчатский край, Россия). В результате ПЦР-диагностики было определено, что в пробе видами-доминантами являлись *Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans* и *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, согласно паспорту культуры микроорганизмов НИГТЦ ДВО РАН.

Руда. Минеральным субстратом для эксперимента была руда, отобранная из отвалов месторождения Шануч. В ранее проведенных экспериментах научно-исследовательской лаборатории НИГТЦ ДВО РАН использовалась руда с этого месторождения. Известно, что для руды с месторождения Шануч характерны следующие доминирующие минералы: пирротин, пентландит, халькоперит и виоларит [24, 25].

Химические анализы, проведенные в химико-аналитической лаборатории НИГТЦ ДВО РАН, показали, что в руде содержались Ni — 3,83 г/кг, Cu — 0,55 г/кг и Co — 0,089 г/кг.

Перед началом эксперимента руду измельчили, размер мелкодисперсных частиц не превышал 100 мкм. После измельчения руда прошла термообработку в сушильном шкафу 1 час при 120 °C.

Условия эксперимента. Эксперименты по активации роста численности бактериальных клеток в автохтонной смешанной культуре проводили в шейкер-инкубаторе фирмы Biosan (модель ES-20/80), колбах Эрленмейера объемом 250 мл.

Параметры культивирования: перемешивание — 150 об/мин, T = 30 °C.

Во время экспериментов использовались два варианта загрузки:

- 1) инокулят (ин.) + руда в соотношениях 1:5 и 1:8,
- 2) бактериальная суспензия (баксуспензия) + руда в соотношениях 1:5 и 1:8. В состав бактериальной суспензии входили питательная среда и инокулят в соотношении 1:4.

Состав питательной среды 9К без железа, г/л: $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - 3 \text{ г}, \text{KCl} - 0,1 \text{ г}, \text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O} - 0,65 \text{ г}, \text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} - 0,5 \text{ г}, \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O} - 0,0144)$.

Растворы фильтровали шприцевыми фильтрами 0,45 мкм (фирма Gelman Sciences), а затем автоклавировали при 1 атм. в течение 1 часа. Значение pH среды для культивирования бактерий составляло 2,02. Поддержание pH осуществляли подкислением H_2SO_4 .

Численность клеток в инокуляте — $4,6 \times 10^7$ кл/мл. Численность клеток при загрузке инокулят + руда: 1:5 — $2,1 \times 10^7$ кл/мл, 1:8 — $0,67 \times 10^7$ кл/мл; баксуспензия + руда в соотношении 1:5 — $0,6 \times 10^7$ кл/мл, 1:8 — $0,1 \times 10^7$ кл/мл. Учитывали только планктонные формы бактерий размером 0,6–5 мкм. Прямой счет клеток проводили с использованием камеры Горяева. При определении pH, Eh осуществлялось на pH-метре/иономере Mettler-Tolado Seven Compact S 220 (погрешность pH $\pm 0,002$, Eh $\pm 0,2$).

Пробы отбирали один раз в сутки на протяжении 15 суток. Эксперименты выполнены в трех повторениях, в результаты записано среднее значение.

Результаты и обсуждения

На рисунке представлены данные о количестве клеток ($\text{N}_{\text{кл}} \times 10^7$) в четырех различных экспериментальных условиях, где руда смешивалась с различными растворами в разных пропорциях. Эти данные позволяют провести сравнительный анализ роста клеток в зависимости от условий и пропорций смешивания.

При условии эксперимента ин. + руда и пропорции смешивания 1:5 при загрузке численность клеток составляет $2,1 \times 10^7$ кл/мл, что является высоким показателем по сравнению с другими вариантами. В течение первых нескольких суток эксперимента численность клеток снижается до $0,03 \times 10^7$ кл/мл и повышаться начинает с пятых суток, демонстрируя незначительное увеличение. Однако начиная с девятых

суток наблюдается резкое увеличение численности клеток, достигая 18×10^7 к концу эксперимента.

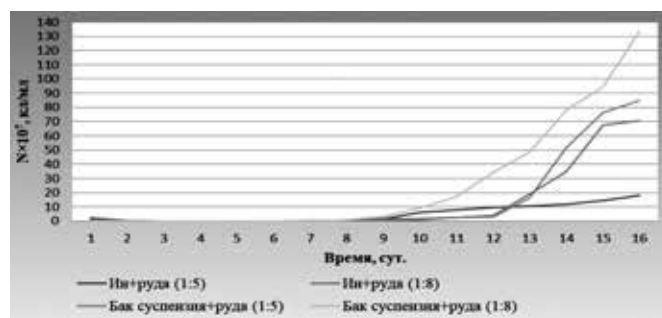


Рис. Динамика роста численности автохтонной смешанной культуры при разных вариантах загрузки

Fig. The growth dynamics comes from the autochthonous mixed culture under different loading options

При условиях эксперимента ин. + руда и пропорциях смешивания 1:8 при загрузке численность клеток составляет $0,67 \times 10^7$ кл/мл, что заметно ниже, чем в первой смеси (1:5). В первые сутки эксперимента также наблюдается снижение численности клеток, но начиная с восьми суток рост клеток становится более интенсивный. Особенно примечателен скачок с $34,9 \times 10^7$ до $67,3 \times 10^7$ кл/мл, а затем до $70,5 \times 10^7$ кл/мл на последних этапах эксперимента. Это указывает на то, что, несмотря на низкое начальное количество клеток, в условиях с более высокой степенью разбавления происходит значительный рост на поздних стадиях эксперимента.

При условиях эксперимента баксуспензия + руда и пропорциях смешивания (1:5) при загрузке численность клеток низкая и составляет $0,67 \times 10^7$ кл/мл. Тем не менее уже к десятым суткам наблюдается стабильный рост, достигая $2,5 \times 10^7$ кл/мл, и далее резко увеличивается до $16,1 \times 10^7$ кл/мл, а затем до $84,7 \times 10^7$ кл/мл.

При условиях эксперимента баксуспензия + руда и пропорциях смешивания (1:8) при загрузке численность клеток

также низкая и составляет $0,1 \times 10^7$ кл/мл. Однако начиная с десятых суток клеточный рост набирает темп, показывая резкие увеличения: с 17×10^7 до $34,5 \times 10^7$ кл/мл и затем до $133,4 \times 10^7$ кл/мл в конце эксперимента. Данный вариант демонстрирует, что даже при минимальном исходном количестве клеток увеличение степени разбавления приводит к значительному увеличению клеточной массы на более поздних этапах.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований оптимизации питательной среды для культивирования автохтонной смешанной культуры ацидофильных хемолитотрофных бактерий, выделенных из окисленной руды месторождения Шануч. В ней рассматривается влияние различных пропорций смешивания руды с инокулятом и бактериальной суспензией на рост численности этих микроорганизмов.

2. Анализ данных показывает, что степень разбавления оказывает значительное влияние на рост численности клеток. Варианты с большей степенью разбавления, такие как ин. + руда (1:8) и баксуспензия + руда (1:8), демонстрируют более значительный рост клеток на поздних стадиях эксперимента. Это указывает на то, что в условиях низкой численности клетки получают возможность активнее размножаться на поздних стадиях.

3. Для достижения максимального роста клеточной массы целесообразно использовать более разбавленные растворы, которые хотя и приводят к медленному старту, но обеспечивают более существенный прирост клеток на поздних этапах эксперимента.

4. Исследование пропорций смешивания руды с бактериальными растворами в гидрометаллургии полезно для оптимизации процессов извлечения металлов. Правильный подбор условий способствует максимальной эффективности биовыщелачивания, что повышает выход ценных металлов, таких как медь и золото. Использование оптимальных концентраций позволяет снизить затраты на реагенты и воду, а также минимизировать время выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Иванов ВИ, Степанов БА. Применение микробиологических методов в обогащении и гидрометаллургии. М., 1960. 125 с. [Ivanov VI, Stepanov BA. Application of microbiological methods in enrichment and hydrometallurgy. Moscow, 1960 (In Russ.).]
- Соколова ГА, Каравайко ГИ. Физиология и геохимическая деятельность тионовых бактерий. М.: Наука. 1964. 336 с. [Sokolova GA, Karavaiko GI. Physiology and geochemical activity of thiobacteria. Moscow, 1964 (In Russ.).]
- Bobadilla-Fazzini R, Poblete-Castro I. Biofilm formation is crucial for efficient copper bioleaching from bornite under mesophilic conditions: unveiling the lifestyle and catalytic role of sulfur-oxidizing bacteria. *Extreme Microbiology*. 2021. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.761997/full>.
- Булаев АГ. Новые направления в развитии биогидрометаллургии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(3-1):56–87. [Bulaev AG. New directions in the development of biohydrometallurgy. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;(3-1):56-87 (In Russ.).] DOI: DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_56.
- Очеретяна СО. Выщелачивание меди из халькоперита в биогидрометаллургии: обзор. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;12(10):256–265. [Ocheretyana SO. Copper leaching from chalcoperite in biohydrometallurgy: a review. *Mining information and analytical bulletin*. 2022;12(10):256-65 (In Russ.).]
- Hosseini SM, Vakilchah F, Baniasadi M, et al. Green recovery of cerium and strontium from gold mine tailings using an adapted acidophilic bacterium in one-step bioleaching approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2022;138:1-8. DOI: 10.1016/j.jtice.2022.104482.
- Dong Y, Zan J, Lin H. Bioleaching of heavy metals from metal tailings utilizing bacteria and fungi: Mechanisms, strengthen measures, and development prospect. *Journal of Environmental Management*. 2023;344:112514. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118511.

8. Хайнасова ТС. Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды в лабораторных условиях с использованием посевной. *Вестник Дальневосточного отделения РАН*. 2014;(4):101–107. [Khainasova TS. Bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore in laboratory conditions using seed culture. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(4):101–7 (In Russ.)].
9. Semerci N, Kunt B, Calli B. Phosphorus recovery from sewage sludge ash with bioleaching and electrodialysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2019;144:104739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104739>.
10. Кондратьева ТФ, Булаев АГ, Муравьев МИ. Микроорганизмы в биоготехнологиях переработки сульфидных руд. М.: Наука. 2015. 212 с. [Kondratieva TF, Bulaev AG, Muravyov MI. Microorganisms in biogeotechnologies of sulfide ore processing. Moscow, 2015 (In Russ.)].
11. Hedrich S, Schippers A. Distribution of acidophilic microorganisms in natural and man-made acidic environments. *Curr. Issues Mol. Biol.* 2021;40:25–48. DOI: 10.21775/9781910190333.10.
12. Васильева ТВ, Блайда ИА, Иваница ВА. Основные группы микроорганизмов, участвующих в биогидрометаллургических процессах. *Проблемы экологической биотехнологии*. 2013;(1):233. [Vasilyeva TV, Blayda IA, Ivanitsa VA. The main groups of microorganisms involved in bio-hydrometallurgical processes. *Problems of ecological biotechnology*. 2013;(1):233 (In Russ.)].
13. Хомченкова АС. Тяжелые металлы и выщелачивание микроорганизмов (обзор). *Горный информационно-аналитический бюллетень (Специальный выпуск № 32 «Камчатка-5»)*. 2017;(12):228–336. [Khomchenkova AS. Heavy metals and leaching of microorganisms (review). *Mining information and analytical bulletin (Special issue № 32 «Kamchatka-5»)*. 2017;(12):228–336 (In Russ.)].
14. Хайнасова ТС. Экологические аспекты распространения ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, перспективных для биовыщелачивания. *Горный информационно-аналитический бюллетень (Специальный выпуск № 57 «Камчатка-7»)*. 2018;(12):198–207. [Khainasova TS. Ecological aspects of the spread of acidophilic chemolithotrophic microorganisms promising for bioleaching. *Mining information and analytical bulletin (Special issue No. 57 «Kamchatka-7»)*. 2018;(12):198–207 (In Russ.)].
15. Хайнасова ТС, Пашкевич РИ. Таксономический анализ культуры ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, принимающей участие в биовыщелачивании сульфидной руды месторождения Шануч. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019;(10):28–33. [Khainasova TS, Pashkevich RI. Taxonomic analysis of the culture of acidophilic chemolithotrophic microorganisms participating in the bioleaching of sulfide ore of the Shanuch deposit. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019;(10):28–33 (In Russ.)].
16. Bosecker K Bioleaching: metal solubilization by microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*. 1997;20(3–4):591–604.
17. Xia J, Yang Y, He H, et al. Investigation of the sulfur speciation during chalcopyrite leaching by moderate the thermophile *Sulfobacillus thermosulfidooxydans*. *International Journal of Mineral Processing*. 2010;94:52–7. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.11.005.
18. Очеретяна СО. Влияние pH и аэрации на смешанную культуру хемолитотрофных ацидофильных бактерий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;12(СВ 10):246–255. [Ocheretyana SO. Effect of pH and aeration on a mixed culture of chemolithotrophic acidophilic bacteria. *Mining information and analytical bulletin*. 2022;12(10):246–55 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_10_246.
19. Hubau A, Guezennec AG, Joulain C, et al. Bioleaching to reprocess sulfidic polymetallic primary mining residues: Determination of metal leaching mechanisms. *Hydrometallurgy*. 2020;197:105484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105484>.
20. Каравайко ГИ, Росси Дж, Агате А. Биоготехнология металлов. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. 375 с. [Karavaiko GI, Rossi J, Agate A, et al. Biogeotechnology of metals. Moscow, 1989 (In Russ.)].
21. Tan SN, Chen M. Early stage adsorption behaviour of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on minerals I: An experimental approach. *Hydrometallurgy*. 2012;119–120:87–94.
22. Yagohobi Moghaddam M, Ranjbar M, Manafi Z, et al. Modeling and optimizing bacterial leaching process parameters to increase copper extraction from a low-grade ore. *Minerals Engineering*. 2012;32:5–7. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.03.008.
23. Yang Y, Diao M, Liu K, et al. Column bioleaching of low-grade copper ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in pure and mixed cultures with a heterotrophic acidophile *Acidiphilium* sp. *Hydrometallurgy*. 2013;131–132:93–8. DOI: 10.1016/j.hydromet.2012.09.003.
24. Трухин ЮП, Степанов ВА, Сидоров МД, Кунгурова ВЕ. Шанучское медно-никелевое месторождение: геологогеофизическая модель, состав и геохимия руд. *Руды и металлы*. 2009;(5):75–81. [Trukhin YuP, Stepanov VA, Sidorov MD, et al. Shanuchskoye copper-nickel deposit: geological and geophysical model, composition and geochemistry of ores. *Ores and metals*. 2009;(5):75–81 (In Russ.)].
25. Трухин ЮП, Балыков АА, Вайнштейн МБ. Бактериально-химическое выщелачивание кобальт-медно-никелевых руд и технологическая схема переработки продуктивных растворов никеля и кобальта. *Горный информационно-аналитический бюллетень (Специальный выпуск «Камчатка-6»)*. 2017;35:5–21. [Trukhin YuP, Balykov AA, Weinstein MB. Bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores and a technological scheme for processing productive solutions of nickel and cobalt. *Mining information and analytical bulletin (Special issue №. 35 «Kamchatka-6»)*. 2017;35:5–21 (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ABOUT THE AUTHOR



*Светлана Олеговна Очеретяна –
кандидат биологических наук, старший
научный сотрудник, Научно-исследовательский
геотехнологический центр Дальневосточного
отделения Российской академии наук,
г. Петропавловск-Камчатский,
<https://orcid.org/0009-0008-6221-8239>,
e-mail: blossom-so@yandex.ru*

*Svetlana O. Ocheretyana –
Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Research
Geotechnological Center Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences (NIGTC FEB RAS),
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation,
<https://orcid.org/0009-0008-6221-8239>,
e-mail: blossom-so@yandex.ru*

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С. И. Фомин, А. Лелен, А. С. Говоров

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: При проектировании карьеров следует учитывать стохастический характер исходных данных, применять экспертный анализ и прогнозные оценки перспектив развития ситуации на рынке минерального сырья. Принимаемые проектные решения при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений должны обеспечивать необходимую норму рентабельности горнодобывающего предприятия в течение всего времени эксплуатации месторождения и обладать определенной устойчивостью к изменениям горнотехнических, горно-геологических и экономических условий разработки. Надежность результатов анализа, оценок и прогнозов зависит от временного горизонта. При большом горизонте прогнозирования повышается вероятность выявления новых, непредвиденных обстоятельств, при которых может потребоваться существенная корректировка проектных решений. Увеличение периода прогнозирования приводит к расширению области возможных проектных решений, увеличению риска их неподтверждения. Прогнозирование спроса и волатильности цен на минеральное сырье, базирующиеся на обоснованных современных представлениях о ценности и уровне потребления различных видов полезных ископаемых в будущем, позволяет повысить надежность проектных решений.

Ключевые слова: сценарии реализации, проект, месторождение, открытая разработка, прогнозирование, надежность, стратегии

Благодарность: Благодарим коллектив кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за содействие в подготовке статьи к опубликованию.

Для цитирования: Фомин С. И., Лелен А., Говоров А. С. Оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 60-66. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_60_66.

PROJECT DECISIONS RELIABILITY ASSESSMENT OF DEFINITION OPENCAST MINING PARAMETERS AND INDICATORS

S. I. Fomin, A. Lelen, A. S. Govorov

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: Introduction. When designing a opencast mine, it is necessary to establish the boundaries of the efficiency zone and develop scenarios for the implementation of the project, recommendations for the formation of the working zone of the opencast mine during the operation of the field, taking into account the stochastic nature of the initial geological data. The higher the recoverable value of minerals, the higher the costs of geological exploration are acceptable to reduce the risk of non-confirmation of the initial design information. The uncertainty of the implementation of design solutions for the development of deposits is explained by a number of factors.

Methodology. The reliability of the implementation of the adopted design decisions decreases sharply with the increase in the forecasting period. It is inexpedient to make realistic forecasts for more than 15 years due to the growth of project and financial risk over time, as well as the discounting factor. Errors in long-term forecasting are compensated by the fact that the economic value of indicators of the distant future is leveled by the procedure of discounting multi-time costs. Methods of quantitative analysis of

project risk are sensitivity analysis, scenario analysis and risk modeling by Monte Carlo. It is expedient to assess the sensitivity of a criterion economic indicator (for example, net present value) to various types of deviations in the initial data accepted at the initial stage of design by developing scenarios for the implementation of the project in various mining and mining and geological conditions, taking into account the volatility of prices and demand in the mineral market.

Conclusions. Systematic consideration of scenarios for the development of the working area of the open pit and the construction of its contours is achieved by taking into account the mutual influence of parameters and indicators, such as the angle of slope of the pit wall, the marginal stripping factor, the boundary cut-off content of useful components.

Summary. Establishment in the design documentation of the opencast mine productivity that is possible in terms of mining technical factors, close to the production capacity of mining equipment, leads to the absence of a reserve for increasing productivity at the mining

enterprise. To ensure the possibility of prompt response to changes in the external conditions of the project implementation, it is advisable to build a reserve of production capacity. On the one hand, the formation and maintenance of reserves reduces the risk of not achieving the design productivity of the opencast mine, and on the other hand, it is associated with additional costs. The creation of reserves provides an opportunity to stabilize the productivity of the open pit in a certain range of volatility of the external conditions of the project implementation.

Keywords: scripts of realization, project, deposit, opencast mining, prediction, reliability, strategies

Acknowledgment: We thank the staff of the Department of Mineral Deposits Development of St. Petersburg Mining University for their assistance in preparing the article for publication.

For citation: Fomin S. I., Lelen A., Govorov A. S. Project decisions reliability assessment of definition opencast mining parameters and indicators. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):60-66. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_60_66.

Введение

При проектировании карьера следует установить границы зоны эффективности и разработать сценарии реализации проекта и рекомендации по формированию рабочей зоны карьера в процессе эксплуатации месторождения, с учетом стохастического характера исходных геологических данных. Чем выше извлекаемая ценность полезных ископаемых, тем большие затраты на геологическую разведку допустимы для уменьшения риска неподтверждения исходной проектной информации.

Ряд фактор объясняют неопределенность реализации проектных решений при разработке месторождений:

1. Исходные горно-геологические данные обладают стохастическим характером. Снижение степени неопределенности геологических данных достигается проведением детальной доразведки, но это влечет за собой рост затрат на работы по геологической разведке месторождения. Суммарные затраты на первоначальную разведку месторождения и возможные ущербы от неподтверждения запасов впоследствии должны стремиться к минимуму.

2. Экспертиза проектной документации проведена на недостаточно квалифицированном уровне.

3. Прогнозирование рынков минерального сырья и политической ситуации в мире содержит в себе ошибочные предположения.

4. Система оценки устойчивости показателей реализации проекта при изменении внешних факторов отсутствует.

Наиболее предпочтительными являются только сценарии проектных решений, в которые заложена возможность адаптации при изменении внешних условий. Гибкость проектных решений и величины видов затрат могут различаться в зависимости от варианта реализации проектного решения. Предпочтение может быть отдано таким сценариям, в которых прямые издержки более высокие, а адаптационные затраты низкие, что дает больше возможностей для гибкого изменения в зависимости от внешних факторов.

Надежность реализации принимаемых проектных решений резко снижается с увеличением периода прогнозирования. Делать реалистичные прогнозы более чем на 15 лет нецелесообразно из-за роста во времени проектного и финансового риска, изменения дисконтирующего фактора.

Неблагоприятные последствия реализации проекта могут быть нивелированы путем разработки, анализа технических, экономических и организационных мероприятий, рекомендованных к внедрению в случае непредвиденных обстоятельств [1–3]:

- создания резервных мощностей и складов продукции, резерва запасов по степени готовности к выемке;
- страхования недвижимости и разработка мер по предотвращению, ликвидации последствий чрезвычайных обстоятельств на опасном производственном объекте.

Проведение мероприятий по созданию стабилизирующих механизмов требует привлечения дополнительных затрат, подлежащих обязательному учету при определении экономической эффективности реализации проекта [4–6].

Цель работы: оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений.

Методология исследований

Оценку чувствительности критериального экономического показателя (например, чистого дисконтированного дохода (ЧДД) к различного рода отклонениям исходных данных, принятых на начальной стадии проектирования, целесообразно осуществлять посредством разработки сценариев реализации проекта в различных горнотехнических и горно-геологических условиях с учетом волатильности цен и спроса на рынке минерального сырья.

Для того чтобы оценить степень влияния различных факторов на величину чистого дисконтированного дохода карьера в количественной форме, целесообразно применить коэффициент эластичности, характеризующий степень реагирования функции на степень изменения аргумента [7–9]:

$$\varepsilon = \frac{100}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta y_i x_i}{\Delta x_i y_i} \quad (1)$$

где n – количество точек на кривой;

y_i – значение функции в i -й точке;

Δy_i – приращение функции в i -й точке;

x_i – значение аргумента в i -й точке;

Δx_i – приращение аргумента в i -й точке.

На рисунке 1 представлен график зависимости относительного изменения ЧДД от относительного отклонения параметров карьера, отрабатывающего крутопадающее рудное месторождение этапами.

По результатам оценки прогнозируемости выделяются параметры и показатели, оказывающие существенное влияние на исследуемый критериальный показатель и подлежащие детальному обоснованию в проектной документации [10–12].

Способ отработки месторождения полезных ископаемых разбиением на этапы влечет за собой дополнительные затраты на формирование временно нерабочего борта (ВНБ) и последующую его расконсервацию.

Блок-схема реализации сценария формирования рабочей зоны карьера с учетом прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья на примере падения цены на рынке минерального сырья представлена на рисунке 2.

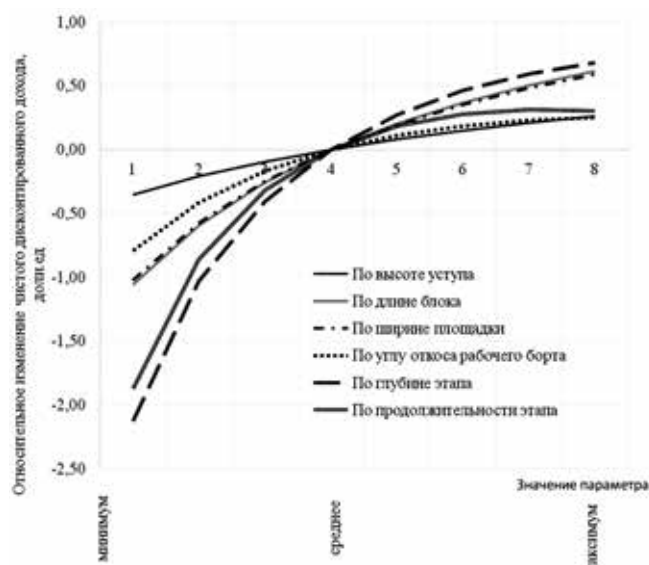


Рис. 1. График зависимости относительного изменения чистого дисконтированного дохода от относительного отклонения параметров карьера, отрабатывающего крутопадающее рудное месторождение этапами
Fig. 1. Graph of the dependence of the relative change in NPV on the relative deviation of the parameters of an open pit mine developing a steeply dipping ore deposit by stages

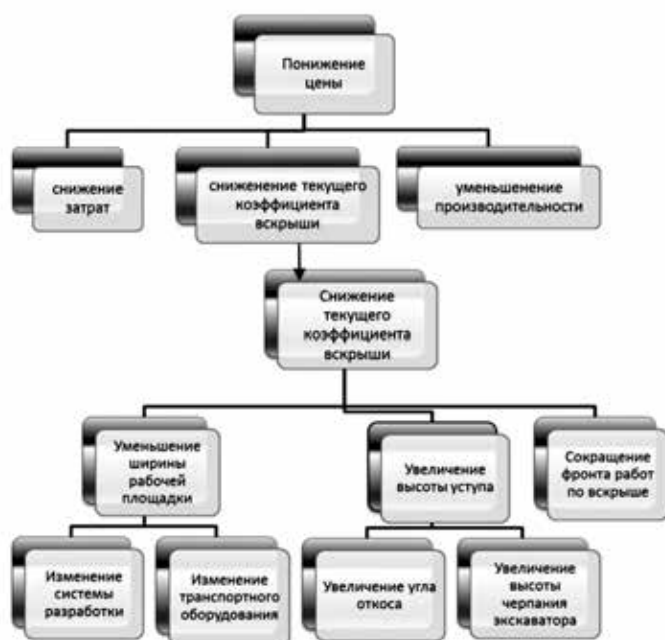


Рис. 2. Блок-схема реализации сценария формирования рабочей зоны карьера с учетом прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья на примере падения цены на рынке минерального сырья
Fig. 2. Block diagram of the implementation of the scenario of formation of open pit's working zone, taking into account the forecasting the situation on the mineral market, on the example of the price drop on the mineral market

Результаты исследований

При проектировании карьеров следует разрабатывать возможные технические, экономические и финансовые решения для различных сценариев развития ситуации на рынке минерального сырья [13–15].

При понижении цен на рынке сырья для обеспечения необходимой нормы рентабельности и целесообразности отработки месторождения карьером необходимо снизить капитальные и эксплуатационные затраты, уменьшить произ-

водительность и текущий коэффициент вскрыши, изменить параметры системы разработки или временно законсервировать работу предприятия до более позитивных внешних условий реализации проекта [16–18].

1. Современная теория принятия проектных решений позволяет снизить уровень неопределенности исходных данных за счет разработанных способов, таких как:

- экспертные оценки, где мнения специалистов оцениваются с точки зрения субъективной вероятности;
- вероятностный подход;
- гарантированный подход;
- байесовский подход.

2. Упрощение алгоритмов решения задач достигается путем корректировки баз данных, что приведет к уменьшению суммарной ошибки в результатах.

3. Проектирование карьеров — это процесс, обладающий неопределенностью в конечном результате. В неопределенность входят исходные финансово-экономические, геологические и горнотехнические данные, носящие стохастический характер. Для достижения состоятельности и эффективности необходимо для оценки использовать достоверные исходные данные с целью минимизации проектного риска. Применение методов стохастического программирования и метода Монте-Карло позволяет при проектировании учесть неопределенность исходных данных. Такими исходными данными являются цены на минеральное сырье, эксплуатационные и капитальные затраты, инфляция и налоги [19–21].

4. Недостатком метода количественной оценки неопределенности в исходных данных является точечное рассмотрение параметров выбранной модели, следовательно, результат также будет соответствовать среднему значению. Представление переменных в виде распределения плотностей вероятностей соответствующей определенной целевой функции позволит повысить информативность результатов при технико-экономическом моделировании процессов [22–24].

5. Современная практика принятия проектных решений включает в себя системный анализ геологических, горнотехнических, экономических факторов, а также анализ рисков инвестирования реализации проектов [25–27].

6. Построение рабочей зоны карьеров с учетом сценариев ее развития может быть реализовано принимая во внимание взаимное влияние параметров и показателей работы системы карьер, таких как угол откоса борта карьера, граничный коэффициент вскрыши, граничное бортовое содержание [28–34].

Заключение

Для достижения и поддержания установленной проектной мощности карьеров по полезному ископаемому рационально проводить такие организационно-технические мероприятия, как:

1. Отработка карьерных полей значительной протяженности очередями. В этом случае разработку месторождения ведут последовательно на относительно технологически независимых участках. Параметры участков определяются с учетом возможности обеспечения нормативной скорости движения фронта горных работ на уступах. Скорость продвижения фронта работ и возможность создания подготовленных и готовых к выемке запасов, определяемых согласно требованиям по обеспечению рационального уровня надежности

работы системы — карьер, определяет продолжительность периода горных работ на каждом участке борта карьера.

2. Применение при проведении горно-строительных и горно-капитальных работ специализированных технологических комплексов горнотранспортного оборудования с меньшими параметрами и размерами позволяет увеличить скорость углубки карьера, уменьшить текущий коэффициент вскрыши и увеличить чистый дисконтированный доход от реализации проекта.

3. Уменьшение длины активного фронта горных работ при отработке месторождения этапами в случае оставления на остальных участках фронта минимальных рабочих площадок.

4. Формирование временно нерабочего борта, остановка выемочно-погрузочных работ на части фронта горных работ и чередование участков отработки позволяет сократить вовлеченный в разработку участок рабочей зоны карьера в плане и по высоте борта [31–33]. Такой способ отработки применяют в случае разработки мощных крутопадающих залежей, когда дно карьера достигает отметки от 100 м и более. В этом случае необходимо разместить на борту карьера полустационарные или буферно-усреднительные склады, если применяется комбинация автомобильного и ж/д транспорта.

5. Расположение на рабочих бортах нескольких перегрузочных пунктов для уменьшения дальности транспортирования горной массы автомобильным транспортом. При этом временно консервируется 30–50 % от общей длины добычного фронта и до 20–30 % общей длины вскрышного фронта. Продолжительность стационарного положения перегрузочного пункта на борту карьера в среднем составляет от 1 года до 3 лет, что позволяет формировать на рабочих бортах полустационарные съезды. Чередование участков ведения горных работ как в плане, так и по высоте рабочей зоны вызывает необходимость увеличения скорости углубки на отдельных участках карьера.

6. Сокращение вовлеченной в отработку рабочей зоны карьера может быть достигнуто за счет очередности ведения

горных работ на смежных рабочих уступах при сокращении ширины рабочей площадки. При уменьшении ширины рабочей площадки до бермы шириной 10–20 м и скорости подвигания фронта горных работ до 40–60 м/год период работ на смежных участках составит 0,5–1 года [34, 35]. Как правило, сокращение рабочей зоны карьера позволяет повысить эффективность использования горно-транспортного оборудования за счет концентрации горных работ.

7. Увеличение углов откосов рабочих бортов на различных этапах разработки месторождения достигается за счет корректировки параметров системы разработки или вида карьерного транспорта, например, переход с железнодорожного на автомобильный.

Выводы

1. В статье приведена оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений.

2. Установлено, что при проведении горно-строительных работ для увеличения скорости углубки, уменьшения капитальных вложений в разработку месторождения и увеличения ЧДД целесообразно сокращение высоты уступов, уменьшение ширины рабочих площадок и применение компактного строительного горнотранспортного комплекса. Формирование в этот период готовых к выемке и вскрытых запасов после завершения горно-строительных работ позволяет осуществлять стабилизацию коэффициента вскрыши и производительности карьера за счет формирования оптимальной формы борта карьера, корректировки способа вскрытия, изменения углов откосов рабочих бортов или формирования временно неработающих участков.

3. Прогнозирование спроса и волатильности цен на минеральное сырье, базирующиеся на обоснованных современных представлениях о ценности и уровне потребления различных видов полезных ископаемых в будущем позволяет повысить надежность проектных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляков НН. Моделирование открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014;(12):45–51. [Belyakov NN. Modeling of open-pit mining. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;(12):45–51 (In Russ.)].
2. Бесимбаев НГ, Нагибин АА. Оптимизация этапов развития карьера. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2013;(8):112–119. [Besimbaev NG, Nagibin AA. Optimization of quarry development stages. *Bulletin of PNIPU. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2013;(8):112–9 (In Russ.)].
3. Бурмистров КВ, Овсянников МП. Обоснование параметров этапа открытых горных работ в переходные периоды разработки крутопадающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018;(6):20–28. [Burmistrov KV, Ovsyannikov MP. Justification of the parameters of the open-pit mining stage during transition periods of development of steeply dipping deposits. *Mining information and analytical bulletin*. 2018;(6):20–8 (In Russ.)]. DOI: 10.25018 / 0236-1493-2018-6-0-20-28.
4. Галиев ЖК, Галиева НВ. Эффективность функционирования крупных угледобывающих предприятий. *Уголь*. 2019;6(1119):59–63. [Galiev ZhK, Galieva NV. Efficiency of large coal mining enterprises. 2019. *Coal*. 2019;6(1119):59–63 (In Russ.)]. DOI: 10.18796 / 0041-5790-2019-6-59-63.
5. Зайцев АЮ. Методический подход к обоснованию капитальных вложений золоторудных месторождений на основе удельных затрат. *Записки Горного института*. 2019;238:459–464. [Zaitsev AYU. Methodological approach to justifying capital investments in gold ore deposits based on specific costs. *Notes of the Mining Institute*. 2019;238:459–64 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.459.

6. Земляной МА, Разоренов ЮИ, Денисов АВ. Экономико-математическая модель оценки технологической схемы добычи мергеля с учетом вовлечения в эксплуатацию запасов сдвоенных, строенных добычных уступов. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2013;3(172):103–106. [Zemlyanoy MA, Razorenov YuI, Denisov AV. Economic and mathematical model for assessing the technological scheme of marl mining taking into account the involvement of reserves of double and triple mining benches in the operation. *News of universities. North Caucasian region. Series: Technical sciences*. 2013;3(172):103–6 (In Russ.).]
7. Катышева ЕГ. Отраслевые особенности формирования собственных финансовых ресурсов на предприятиях горной промышленности. *Новый взгляд. Международный научный вестник*. 2014;(4):172–185. [Katysheva EG. Industry features of the formation of own financial resources at mining enterprises. *New look. International scientific bulletin*. 2014;(4):172–85 (In Russ.).]
8. Косолапов АИ, Пташник АИ, Пташник ЮП. Исследование возможности вариаций производственной мощностью рудных карьеров при разработке крутопадающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013;(9):55–61. [Kosolapov AI, Plashnik AI, Plashik YuP. Study of the possibility of varying the production capacity of ore quarries during the development of steeply dipping deposits. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(9):55–61 (In Russ.).]
9. Косолапов АИ, Паршина ЕА. Исследование потенциальных возможностей интенсификации производственной мощности карьеров при этапной разработке крутопадающих месторождений в современных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011;(6):50–66. [Kosolapov AI, Parshina EA. Study of potential possibilities of intensification of production capacity of quarries during staged development of steeply dipping deposits in modern conditions. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;(6):50–66 (In Russ.).]
10. Капутин ЮЕ. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра, 2002. 424 с. [Kaputin YuE. Mining computer technologies and geostatistics. St. Petersburg, 2002 (In Russ.).]
11. Капутин ЮЕ. Информационные технологии планирования горных работ. СПб.: Недра, 2008. 420 с. [Kaputin YuE. Information technologies for planning mining operations. St. Petersburg, 2008 (In Russ.).]
12. Немова НА, Бельш ТА. Оценка вариантов отработки прибортовых и подкарьерных запасов рудника «Олений ручей». *Известия ТПУ*. 2020;331(2):45–51. [Nemova NA, Belsh TA. Evaluation of development options for the near-pit and under-pit reserves of the Oleniy Ruchey mine. *Izvestiya TPU*. 2020;331(2):45–51 (In Russ.).]
13. Пешкова МХ, Шульгина ОВ. Современные методы оценки инвестиционной привлекательности компаний минерально-сырьевого комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(S1):193–208. [Peshkova MKh, Shulgina OV. Modern methods for assessing the investment attractiveness of companies in the mineral resources complex. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(S1):193–208 (In Russ.).]
14. Ракишев БР. Классификация технологических комплексов открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014;(S1):297–306. [Rakishev BR. Classification of open-pit mining technological complexes. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;(S1):297–306 (In Russ.).]
15. Логинов ЕВ, Тюленева ТА. Управление параметрами карьера в целях повышения эффективности использования гидравлических экскаваторов типа обратная лопата. *Уголь*. 2021;(12):6–10. [Loginov EV, Tyuleneva TA. Management of quarry parameters in order to increase the efficiency of using hydraulic backhoe excavators. *Coal*. 2021;(12):6–10 (In Russ.).] DOI 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10.
16. Ракишев БР. Обоснование порядка формирования рабочих зон на глубоких карьерах при экскаваторно-автомобильных комплексах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(1):27–34. [Rakishev BR, Moldabaev SK. Justification of the procedure for the formation of working zones in deep quarries with excavator-truck complexes. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(1):27–34 (In Russ.).]
17. Соколов ИВ, Смирнов АА, Никитин ИВ. Методика экономической оценки долгосрочных стратегических решений при комбинированной разработке рудных месторождений. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2021;(3):314–325. [Sokolov IV, Smirnov AA, Nikitin IV. Methodology for economic assessment of long-term strategic decisions in the combined development of ore deposits. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2021;(3):314–25 (In Russ.).] DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-308-319.
18. Титова АВ, Голик ВИ. К диверсификации рудодобывающего комплекса как направления развития экономической системы депрессивного типа. *Горная промышленность*. 2020;(6):112–117. [Titova AV, Golik VI. Towards diversification of the ore mining complex as a direction for the development of a depressive-type economic system. *Mining Industry*. 2020;(6):112–7 (In Russ.).] DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-112-117.
19. Толобекова БТ. Особенности принципов управления современными горными проектами. *Проблемы науки*. 2018;5(29):117–119. [Tolobekova BT. Features of the principles of management of modern mining projects. *Problems of Science*. 2018;5(29):117–9 (In Russ.).]

20. Трубецкой КН, Краснянский ГЛ, Хронин ВВ. Проектирование карьеров: Учебник для вузов: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Академии горных наук, 2001. Т. I. 519 с. [Trubetskoy KN, Krasnyansky GL, Khronin VV. Design of quarries: Textbook. for universities: In 2 volumes. 2nd ed., revised. and enlarged. Moscow, 2001(In Russ.)].
21. Blischenko AA. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open-pit mines (quarries). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019;58-62. DOI: 10.1201/9781003017226-8.
22. Пасынков ДВ, Семенов АС. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров. *Записки горного института*. 2009;180:12–15. [Pasynkov DV, Semenov AS. Determination of investment efficiency in the implementation of ore quarry projects. *Notes of the Mining Institute*. 2009;180:12-5 (In Russ.)].
23. Фомин СИ, Пасынков ДВ, Семенов АС. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров. *Записки Горного института*. 2009;180:12–14. [Fomin SI, Pasynkov DV, Semenov AS. Determination of investment efficiency in the implementation of ore quarry projects. *Notes of the Mining Institute*. 2009;180:12-4 (In Russ.)].
24. ОВ. Шпанский, Лигоцкий ДН, Борисов ДВ. Проектирование границ открытых горных работ: учеб. Пособие. СПб.: Изд-во СПГИ(ТУ). 2003. 90 с. [Shpanskiy OV, Ligotsky DN, Borisov DV. Design of open-pit mining boundaries: a tutorial. Plekhanov State Mining Institute (Technical University). St. Petersburg, 2003 (In Russ.)].
25. Armstrong M, Lagos T, Emery X, et al. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources Policy*. 2021;72:515-29. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102086.
26. Фомин СИ, Пасынков ДВ, Семенов АС. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров. *Записки Горного института*. 2009;180:12-14. [Fomin SI, Pasynkov DV, Semenov AS. Determination of investment efficiency in the implementation of ore quarry projects. *Notes of the Mining Institute*. 2009;180:12-4 (In Russ.)].
27. Череповицын АЕ, Ларичкин ФД, Новосельцева ВД. [и др.] Методические подходы к сценарному планированию в минерально-сырьевом комплексе. *Проблемы развития территории*. 2017;6(92):53–67. [Cherepovitsyn AE, Larichkin FD, Novoseltseva VD, et al. Methodological approaches to scenario planning in the mineral resource complex. *Problems of development of the territory*. 2017;6(92):53-67 (In Russ.)].
28. Kholmiskiy AV, Sidorov DV. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019;71-4. DOI: 10.1201/9781003017226-10 29.
29. Sidorenko AA, Sidorenko SA, Ivanov VV. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the taldinskaya-zapadnaya-2 mine. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021;16(5):568-74.
30. Koteleva N, Valnev V. Automatic detection of maintenance scenarios for equipment and control systems in industry. *Applied Sciences*. 2023;13(24):12997. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132412997>.
31. Арсентьев АИ. Производительность карьеров. СПб., 2002. 85 с. [Arsentiev AI. Quarry productivity. Saint Petersburg, 2002 (In Russ.)].
32. Gilani S-O, Sattarvand J, Hajihassani M, Abdullah SS. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020;68:12997. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738.
33. Hustrulid W, Kuchta M. Open Pit Mine: Planning & Design. Rotterdam; Brookfield, VT: A.A. Balkema, 1998. 735 p.
34. Hall BE. «How mining companies improve share price by destroying shareholder value» Paper 1194 in Proceedings CIM Mining Conference and Exhibition. – Montreal: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
35. Dimitrakopoulos R, Martinez L, Ramazan S. «Optimizing open pit design with simulated orebodies and Whittle Four-X: A maximum upside/minimum downside approach» In Proceedings of Orebody Modeling and Strategic Mine Planning Symposium, ed. R. Dimitrakopoulos and S. Ramazan. Perth. Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



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

Sergey I. Fomin –
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of
Development of Mineral Deposits, St. Petersburg
Mining University of Empress Catherine II, St.
Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>, e-mail: fominsi@mail.ru



Лелен Алекса —
аспирант, Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, г.
Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>, e-mail: s215134@stud.spmi.ru

Aleksa Lelen —
postgraduate student of the department of construction
of Development of Mineral Deposits, St. Petersburg
Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>,
e-mail: s215134@stud.spmi.ru



Говоров Алексей Сергеевич —
аспирант, Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, г.
Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>, e-mail: s215078@stud.spmi.ru

Alexey S. Govorov —
postgraduate student of the department of construction
of Development of Mineral Deposits, St. Petersburg
Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>,
e-mail: s215078@stud.spmi.ru

Критерии авторства / Contribution:

С. И. Фомин — разработка концепции исследования, экспертное сопровождение проведения исследования, написание и корректировка текста статьи; А. Лелен — литературный обзор по теме исследования, проведение математического моделирования, написание текста статьи; А. С. Говоров — литературный обзор по теме исследования, разработка графических материалов, написание текста статьи / S. I. Fomin — development of the research concept, expert support for the research, writing and editing the text of the article; A. Lelen — literature review on the research topic, mathematical modeling, writing the text of the article; A. S. Govorov — literature review on the research topic, development of graphic materials, writing the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ ИСЧИСЛЕНИЯ НАЛОГА НА ДОБЫЧУ УГЛЯ

М. В. Писаренко^{1,2}, В. В. Аксенов¹, С. В. Шаклеин¹

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация

²Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Аннотация: Анализ действующей схемы налогообложения добычи угля показал отсутствие актуальных нормативно-методических документов для определения налоговой базы, слабую дифференциацию ставок налога на добычу в зависимости от геологических, горнотехнических, технологических условий разрабатываемых участков недр. Обозначенные недостатки снижают эффективность изъятия налога на добычу, провоцируют судебные разбирательства между налоговой службой и недропользователями, ставят недропользователей, разрабатывающих участки недр в разных природных условиях, в неравные отношения и предопределяют необходимость совершенствования схемы налогообложения добычи. Анализ мирового и отечественного опыта платного недропользования и теоретические исследования в этой области предполагают переход на платежи за пользования недрами, напрямую облагающие доход, генерируемый при добыче полезного ископаемого. Результаты расчетов, проведенных на финансово-экономической модели реального горного проекта, позволили оценить эффективность реализации четырех принятых схем налогообложения добычи (в том числе и действующей) на конечный результат инвестиционного проекта и предложить следующую концептуальную схему. До возмещения капитальных вложений исчисление налога осуществляется на основе налога на добычу, который определяется в зависимости от стоимости товарной продукции по фиксированной ставке (4 % – для коксующихся углей и антрацита, 2 % – для «прочих» и бурых углей). При выходе добывающего предприятия на рентабельную работу платежи за добычу осуществляются по схеме налога на дополнительный доход.

Ключевые слова: уголь, налогообложение, схема, горная рента, налог на добычу, налог на дополнительный доход, налоговая база

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук»: проект «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024–2025 гг.» (рег. № 124041100072-6).

Для цитирования: Писаренко М. В., Аксенов В. В., Шаклеин С. В. Совершенствование схемы исчисления налога на добычу угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 67-74. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_67_74.

CONCEPTUAL APPROACHES TO TAXATION COAL MINING

М. V. Pisarenko^{1,2}, V. V. Aksenov¹, S. V. Shaklein¹

¹Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Kemerovo, Russian Federation

²T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Abstract: An analysis of the current taxation scheme for the coal industry made it possible to identify the following shortcomings: the lack of normative and methodological documents on determining and controlling the tax base, as well as weak differentiation of mineral extraction tax depending on the mining-geological, technical, technological conditions of mining works and quality of extracted products. The noted shortcomings put subsoil users in unequal conditions and reduce the efficiency of extraction tax collection. This predetermines the need for a new production taxation scheme. The most effective, as the world experience of taxation in the field of subsoil use has shown, is a scheme that directly taxes additional income generated during the extraction of minerals, i.e. transition to rental relations. Model calculations based on the financial model of cash flows of a real mining project of the main indicators of the project in the context of the implementation of various production taxation schemes made it possible to propose a combined taxation scheme: before the reimbursement of investments, the withdrawal of mining rent is carried out on the basis of the mineral extraction tax, and then, upon reaching profitable production, switching to the additional tax. The proposed scheme for the withdrawal of mining rent will theoretically reduce tax risks and increase contributions to the budget, while maintaining the investment attractiveness of coal mining.

Keywords: taxation scheme, mining rent, mineral extraction tax, additional income tax, financial model of a mining project

Acknowledgement: The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Re-search Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences: Project «Development of efficient technologies of coal mining by robotic mining complexes operating with-out permanent presence of personnel in mining zones, design of control systems and methods to assess their technical condition and operating life as well as justification of the mineral resource base reproduction. 2024–2025» (Reg. No. 124041100072-6).

For citation: Pisarenko M. V., Aksenov V. V., Shaklein S. V. Conceptual approaches to taxation coal mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):67-74. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_67_74.

Введение

Россия обладает запасами практически всех известных полезных ископаемых. А по целому ряду ископаемых (нефть, природный газ, уголь, железная руда, никель, кобальт, медь, вольфрам, золото, серебро, алмазы, фосфаты, калийные соли) входит в число мировых лидеров [1].

Минерально-сырьевой сектор России в виде налога с добычи полезных ископаемых и других платежей вносит значимый вклад в формирование бюджета страны. В 2023 году 14 % валового внутреннего продукта страны и около 49,5 % доходной части бюджета обеспечено за счет налога на добычу полезных ископаемых и других налогов и сборов [1].

В структуре налоговых поступлений в консолидированный бюджет РФ около 27 % приходится на налог на добычу полезных ископаемых (далее – НДПИ). Практически весь объем поступлений НДПИ, за исключением добычи угля, железной руды и алмазов (часть отчислений которых остается в региональных бюджетах), аккумулируется в федеральном бюджете [2].

Для стран с ресурсно-ориентированной экономикой построение эффективной схемы налогообложения добычи полезных ископаемых является приоритетной и сложной задачей. Такая схема должна гарантировать получение собственником недр большей части рентного дохода – горной ренты, образуемой в результате добычи полезного ископаемого, а также обеспечивать сохранение на достаточном уровне стимула для инвестирования и долгосрочного развития сектора добычи полезных ископаемых и рациональное использование недр [3–10]. При этом система налогообложения в секторе добычи минеральных ресурсов должна отличаться от других отраслей, так как ей присущи риски, нехарактерные для других секторов экономики, возникающие в связи с неопределенностью исходной геологической информации об объекте добычи, высокими капитальными вложениями, волатильностью рынка сырья, увлеченным сроком возврата капитальных вложений.

Многолетний опыт налогообложения угольной промышленности в России указывает на наличие серьезных недостатков в его организации и, следовательно, на необходимость совершенствования.

Налогообложение добычи угля в России

Система налогообложения добычи полезных ископаемых в России была введена более 30 лет назад и по углям включала: разовые платежи за получение права пользования недрами при лицензировании и регулярные отчисления на воспроизводство минерально-сырьевой базы и за право пользования недрами. Значения регулярных платежей закреплялись в лицензиях на право добычи и устанавливались с учетом рентообразующих факторов для каждого месторождения индивидуально на основе экспертных оценок. Основными недостатками такой схемы являются: сложность, непрозрачность и субъективность экспертного подхода к расчету регулярных платежей за право пользования недрами.

В 2002 году была введена новая система налогообложения, согласно которой отменялись отчисления на воспроизводство минерально-сырьевой базы, а вместо дифференцированных платежей за право добычи была введена по углям адвалорная ставка в 4 %. В результате нововведений была существенно упрощена и унифицирована система налогообложения. Однако несовершенство законодательства позволяло недропользователям задействовать легальные механизмы «оптимизации» налогообложения. Так как НДПИ исчислялся исходя из стоимости товарной продукции, то при его определении использовались внутрикорпоративные цены, которые устанавливались существенно ниже реальной цены продукции, снижая тем самым налоговые отчисления. В результате поступления НДПИ в 2002 году сократились (почти на 37,5 %), а в последующие годы их величина постоянно отставала от роста цен на уголь [11].

С 2011 года была введена принципиально новая схема, действующая и ныне. НДПИ исчисляется исходя из объема добытого полезного ископаемого и фиксированной ставки (рублей на тонну) в зависимости вида угля. Согласно пункту 2 статьи 342 части второй Налогового кодекса РФ (далее – НК РФ) были выделены четыре вида угля: антрацит, бурый, коксующийся и «прочий». Величина ставки составила 57 руб. за 1 т для коксующегося угля, 47 руб. – для антрацита, 11 руб. – для бурого угля и 24 руб. – для «прочего» и подлежала ежеквартальной коррекции посредством коэффициентов-дефляторов, устанавливаемых Минэкономразвития РФ.

Действующая налоговая схема проста в исполнении и администрировании, исключает негативные последствия предвзятости, но обладает рядом существенных недостатков.

Государственным стандартом каменные угли, на которые приходится основной объем угледобычи в России (более 77 % общего объема), были разделены на 15 технологических марок, различающихся по технологическим свойствам и имеющих различную ценность. В целях же налогообложения каменные угли были разделены всего на два вида (коксующиеся и «прочие»), марочная принадлежность которых определена Постановлением правительства РФ от 20.06.2011 № 486.

В результате такого деления по одной и той же ставке рассчитывается НДПИ для высокоценных углей марки К, предназначенных для коксохимической промышленности (цена тонны рядового угля, по данным Санкт-Петербургской Международной товарно-сырьевой биржи составляла в феврале-марте 2024 года 13,2 тыс. руб.), так и для менее ценных слабоспекающихся углей марки КС (стоимость которых в тот же период была значительно ниже – 4,1 тыс. руб.). К «прочим» видам угля Правительством РФ одновременно были отнесены как длиннопламенный уголь марки Д (цена тонны которого при базовой калорийности 7 тыс. ккал/кг, по данным Санкт-Петербургской Международной товарно-сырьевой биржи, составила в феврале-марте 2024 года 1,9 тыс. руб.), так и тощий уголь марки Т (стоимость которого при той же калорийности составляла 4,1 тыс. руб.), так и цена окислен-

ных углей. Для исчисления НДСП столь значимо разных по ценности углей применяется единая налоговая ставка.

При реализации действующей схемы налогообложения отмечается нестабильность порядка определения налоговой базы — добычи и потерь угля по чистым угольным пачкам [12], о чем свидетельствуют многочисленные судебные споры между налоговыми органами и недропользователями. В НК РФ регламентируется, что налоговая база определяется недропользователем самостоятельно прямым или косвенным методами. Однако четкого понимания содержания прямого и косвенного метода нет. При этом, как отмечается в работе [12], нормативные документы, которыми руководствуется недропользователь при исчислении налоговой базы, сформированы задолго до введения действующей схемы НДСП и не содержат методик определения добычи и потерь применительно к действующей налоговой схеме. В частности, при прямом методе, который применяется преимущественно при подземном способе добычи, используются замеры в горных выработках, однако рекомендации по плотности и порядку их проведения отсутствуют. Косвенный метод, используемый преимущественно при открытой добыче угля, опирается на положение НК РФ, в соответствии с которым сумма добычи и потерь в пределах отработанного контура на практике приравнивается к заключенным в нем балансовым запасам, определенным по данным геологоразведки. При этом упускается из виду тот факт, что реально разница между балансовыми запасами и фактической добычей равна не потерям, а сумме потерь и неподтверждения запасов [12]. Это неподтверждение обусловлено присущими геологоразведочным данным погрешностями, необходимость учета которых НК РФ не рассматривается.

Главным недостатком действующей налоговой схемы является практически отсутствие дифференциации налоговой нагрузки в зависимости от горно-геологических, горнотехнических, качественных и технологических особенностей обрабатываемых участков недр, которые определяют экономическую эффективность добычи угля. Это ставит недропользователей, осуществляющих добычу в разных условиях, в неравные положения: разработка запасов, залегающих в благоприятных природных условиях, приносит сверхприбыли, а залегающих в сложных горно-геологических условиях, оказывается низкоэффективной.

Анализ многолетних поступлений НДСП по углю указывает на постоянное отставание налоговых поступлений от роста цен на уголь и неэффективное их изъятие [11]. В «Основных направлениях бюджетной, налоговой и таможенно-тарифной политики на 2024–2026 годы» также отмечена низкая налоговая нагрузка по углю по сравнению с другими отраслями горно-металлургического комплекса. По расчетам Минфина РФ, НДСП в черной металлургии составляли 10 %, в цветной и драгоценных металлов — 15 %, а в угольной промышленности — 2 %, поэтому Минфином и ставится вопрос о возможности повышения налога на добычу угля [13]. Однако этой инициативой не предусматривается каких-либо изменений в действующей схеме и дифференциации налоговых отчислений. Предлагается повышение ставки НДСП на 380 руб. на тонну вне зависимости от вида угля, аналогично схеме, действовавшей с 1 января по 31 марта 2023 года. Такая фискальная политика для недропользователей, осуществляющих добычу малоценных энергетических и коксующихся марок углей в сложных горно-геологических условиях, приведет не только к сокращению инвестиций в отрасль, но и к закрытию предприятий.

По мнению ряда исследователей [5–8, 14–16], справедливое налогообложение добычи полезных ископаемых должно основываться на дифференциации отчислений за добычу в зависимости от рентообразующих факторов.

Мировая практика налогообложения добычи полезных ископаемых

Известно, что налогообложение добывающих компаний наряду с фискальной функцией направлено и на стимулирование воспроизводства сырьевой базы и рациональное ее использование. Опыт передовых угледобывающих стран мира подсказывает [20–21], что основными видами платежей при добыче полезных ископаемых являются бонусы, рента, роялти и налоги. Бонусы являются разовыми платежами, чаще всего их размер и этап выплат определяются в договорах.

Наиболее распространенным рентным налогом во многих странах остается роялти, который определяется, как правило, по фиксированной ставке или прогрессивной шкале и привязывается к стоимости реализованной продукции или доходам. В каждой стране, а в отдельных странах (США, Канаде, Австралии) даже в каждом штате, действует своя схема исчисления рентных платежей.

В Австралии рентные платежи исчисляются по ставке 22,5 % от прибыли, равной доходу за вычетом расходов на добычу, а роялти (налог штата) — по ставке 7–10 % от стоимости добытого угля или объема добычи. В штате Новый Южный Уэльс ставка роялти дифференцируются по способу добычи и условиям разработки: на разрезах составляет 8,2 %, на шахтах — 7,2 %, при этом для «глубоких» шахт — 6,2 % [21].

В Канаде в каждой провинции (территории) устанавливается и взимается свой налог на добычу угля. В Квебеке налог взимается по фиксированной ставке в размере 16 % от годовой прибыли горнодобывающей деятельности. В Онтарио ставка составляет 5–10 % от прибыли предприятия и удаленности района. Например, ставка 5 % применима для «удаленной» шахты. В Британской Колумбии налог на добычу взимается в два этапа: 2 % — налог на чистую текущую выручку (доход за вычетом определенных видов эксплуатационных затрат) и 13 % — налог на чистую прибыль (чистые текущие поступления за вычетом капитальных затрат, затрат на разведку и подготовку к добыче, инвестиционных затрат).

В США размер роялти при добыче угля для федеральных земель составляет 3,0–12,5 % в зависимости от выручки (оборота) и способа добычи (12,5 % при открытой добыче и 8 % при подземной). В штате Невада — 2–5 % от чистой прибыли (валовой доход за минусом стоимости добычи, транспортных расходов, амортизации, маркетинга и доставки полезных ископаемых, страховки от пожара, страховки работников) [21].

В Индии рентные доходы слагаются из роялти, который рассчитывается по двукратной ставке, равной 5 % от цены реализации угля (цена без учета транспортных расходов до потребителя), и налога за отчуждение земель в зависимости от площади изъятия (до 1 тыс. индийских рупий за гектар в год).

В Индонезии роялти на уголь исчисляется от дохода по ставке от 3 до 7 %, а в Южной Африке ставка роялти на уголь составляет 0,5–7,0 % от валовой выручки, в Бразилии — 2 % от чистой выручки (выручка от продажи за вычетом налогов, взимаемых с доходов, страхования и расходы на транспорт).

В Китае рентный налог представлен суммами, исчисляе-

мыми на тонну в зависимости от вида полезного ископаемого (2–8 юаня за тонну добычи), роялти — по ставке от 0,5 до 4,0 % от дохода (оборота) и отчислениями за право разведки и добычи, размер которых зависит от площади объекта (около 1 тыс. юаней в год/км²).

Анализ налоговых режимов угледобывающей промышленности в различных странах мира, позволяет заключить:

- универсальной системы налогообложения сырьевого сектора, которая приемлема для всех стран, не существует: каждая страна с учетом экономических реалий использует свою схему изъятия горной ренты, механизм которой постоянно совершенствуется;

- распространенным рентным налогом во многих странах остается роялти, рассчитываемый чаще всего по адвалорной ставке;

- реализуется, как правило, несколько механизмов налогообложения;

- наблюдается тенденция на изъятие ресурсно-рентных налогов, рассчитываемых на основе показателей доходности или прибыльности инвестиционных проектов, что теоретически позволяет изъять большую часть горной ренты при сохранении инвестиционной привлекательности сырьевого сектора.

Концептуальные подходы к изъятию горной ренты

В работах [5–10] отмечается, что налоговая нагрузка должна устанавливаться в зависимости горно-геологических, технологических, географических факторов, определяющих экономическую эффективность добычи (прибыльность) горнодобывающего предприятия. Приблизиться к этому можно двумя путями. Первый — совершенствование схемы налогообложения недропользователей путем дифференциации ставок НДС вводом корректирующих коэффициентов, значение которых определяется природными условиями разрабатываемого участка недр.

Приверженцы такого подхода [22–23] предлагают, основываясь на производственном опыте, использовать следующие коэффициенты, которыми учитываются:

- опасность шахт по внезапным выбросам и горным ударам;
- глубина ведения горных работ;
- мощность рабочих пластов;
- зольность добываемой горной массы.

Реализация этого пути предполагает обоснование перечня значимых коэффициентов и значений каждого из них с оценкой синергетического эффекта от их введения на конечный результат, что представляет трудноразрешимую задачу.

Второй путь — переход к исчислению налоговой нагрузки на основе экономического подхода [5–6, 8–10, 14, 24–28]. Поскольку горная рента генерируется при извлечении полезного ископаемого и не зависит от экономической деятельности недропользователя, т. е. это «незаработанный доход», то и предлагается исчислять ее исходя от дохода от добычи полезного ископаемого, часть которого принадлежит недропользователю, а большая часть — собственнику недр, т. е. государству. Теоретически такой подход представляется наиболее логичным и эффективным. Так как доход угледобывающего предприятия определяется разницей между стоимостью реализованной продукции и понесенными суммарными затратами на ее добычу (включая капитальные вложения), которые зависят от горно-геологических, горно-технических, экономических и прочих условий разработки.

Подобная схема изъятия горной ренты введена с 1 января 2019 года в виде налога на дополнительный доход (НДД) для отдельных групп месторождений углеводородов. Целью введения НДД было стимулирование добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов.

Согласно главе 25.4 НК РФ, налог на дополнительный доход взимается с суммы дополнительного дохода, полученного налогоплательщиком в результате осуществления деятельности по добыче углеводородного сырья на участке недр. Налоговая база рассчитывается как положительная разница между доходами (расчетной выручкой) и фактическими расходами, понесенными при добыче углеводородного сырья на участке, и расчетными расходами, связанными с транспортировкой и таможенными пошлинами. Причем налоговый период в этом случае равен одному году, а ставка налога составляет 50 %.

Схема изъятия горной ренты на основе НДД обеспечивает дифференциацию налоговой нагрузки в зависимости от конкретных условий добычи. На начальных стадиях освоения месторождения, когда еще не возмещены капитальные затраты, налог НДС отсутствует и начинает взиматься при достижении окупаемости затрат и рентабельной работы.

Однако переход на НДС, что отмечается рядом исследователей [25, 28], чреват следующими негативными последствиями.

Во-первых, администрирование и прогнозирование данного налога в отличие от НДС сложнее, так как налоговым органам придется контролировать издержки добывающих компаний, а у последних появится соблазн к завышению затрат производства. Это возможно предупредить, если законодательно определить состав затрат, которые следует относить непосредственно к добыче угля, а также процедуру контроля их исполнения. Подобное уже законодательно определено в отношении исчисления НДС для месторождений углеводородов. В частности, введены ограничения по максимально допустимому уровню затрат, специальные нормы амортизации премий, налоговое администрирование и т. д.

Во-вторых, основным недостатком НДС является то, что в бюджет рентные отчисления поступают только при достижении высокой доходности инвестиционных проектов [26, 28–29]. Применительно к угледобывающим предприятиям период выхода предприятия на рентабельную работу составляет от 5–8 лет и более, поэтому существует высокий риск вообще не получить горную ренту.

Следует отметить, что концепция налогового режима на основе изъятия части дополнительного дохода не исключает и НДС, который отчисляется вне зависимости от эффективности проекта и снижает риски неполучения рентных отчислений. Поэтому на этапе адаптации новой налоговой схемы на основе НДС, по-видимому, следует сохранить НДС, но изменить подход к его исчислению.

Предлагается за налоговую базу принять выручку от реализации (цена 1 тонны продукции, умноженная на количество отгруженной продукции, содержащееся в счетах-фактурах). НДС определять, например, по следующим адвалорным ставкам: 4 % — для коксующихся углей и антрацитов и 2 % — для остальных углей.

В международной практике для исключения использования трансфертных цен при исчислении налога пользуются биржевыми или специальными справочными (рыночными) ценами, определенные тем или иным способом. В России угольная биржа пока слабо развита (объемы торговли на Санкт-Петербургской бирже составляют около 10 % от добычи). Поэтому пред-

лагается в зависимости направления поставок (внутренний или внешний рынок) использовать среднюю цену, сложившуюся на технологическую марку угля на соответствующем рынке, без учета затрат на транспорт до потребителя (на условиях FAC). А цены на технологические марки для исчисления налога публиковать на сайте Минэкономразвития.

Материал и методы исследования

Для оценки эффективности налоговых схем предлагается принять подход, обоснованный в [30], суть которого заключается определении основных показателей инвестиционных проектов (далее — ИП) в условиях различных налоговых схем на основе финансово-экономической модели денежных потоков ИП.

Финансово-экономическая модель ИП на разработку участка недр, включающая объем добычи, качество извлекаемых запасов, объем инвестиций и затрат на добычу и других показателей ИП, разрабатывается согласно [31] и содержится в материалах технико-экономического обоснования постоянных разведочных кондиций (далее — ТЭО) и технических проектов на разработку участка недр.

Для сравнения налоговых схем, как и в [30], предлагается использовать следующие основные показатели ИП: чистый доход (ЧД), дисконтированный чистый доход (ЧДД), внутреннюю норму доходности (ВНД), а также недисконтированную и дисконтированную сумму налогов, которые рассчитываются на весь срок отработки запасов участка.

В данной работе в вычислительных экспериментах принята финансово-экономическая модель ИП, представленная в материалах ТЭО постоянных разведочных кондиций одного из реальных горных объектов, разработанная в условиях и ценах первого квартала 2024 года. Согласно принятым в ТЭО решениям, отработка запасов участка предполагается в простых горно-геологических условиях открытым способом с производственной мощностью 1,5 млн т в год. В отработку вовлекаются тонкие пласты коксующегося угля (марок КС и ОС) наклонного залегания мощностью от 0,7 до 1,6 м. Срок отработки запасов участка составляет 13 лет, капитальные вложения оцениваются в 27,9 млрд руб. Техничко-экономические показатели от-

работки данного участка недр демонстрируют достаточно высокую для угольных проектов эффективность: истый дисконтированный доход (ЧДД) при ставке дисконтирования 10 % — 2,9 млрд руб., внутренняя норма доходности (ВНД) — 22,9 %, что объясняется высокой ценой товарной продукции (принятая цена концентрат марки КС — 9,1, а КО — 10,4 тыс. руб/т на условиях FAC).

В условиях финансово-экономической модели ИП выполнена оценка эффективности реализации следующих четырех схем налогообложения:

схема 1 — действующая схема налогообложения;

схема 2 — предложения Минфин: увеличение ставки НДС на 380 руб/т вне зависимости от вида угля;

схема 3 — изъятие 50 % дополнительного дохода ИП (по схеме НДС);

схема 4 — комбинированная, одновременно включающая НДС, исчисленный по адвалорной ставке 4 %, и НДС.

Результаты исследования

Результаты модельных расчетов основных показателей ИП сведены в таблицу, а на рисунке представлены годовые суммарные недисконтированные и дисконтированные налоговые поступления по схемам 3 и 4 за период отработки участка недр.

В приведенных результатах суммарные налоговые отчисления включают только налог на прибыль, НДС и НДС, значения которых изменяются в зависимости от налоговой схемы, остальные предусмотренные налоговые отчисления и платежи остаются постоянными. Следует отметить, что при реализации схемы 3 и схем 4 налог НДС возникает, когда инвестиции окупились и накопленный ЧДД становится положительным. Когда для разработки участка недр потребовались дополнительные капитальные вложения и ЧДД принимал отрицательное значение, то налогообложение по НДС приостанавливалось.

Обсуждение результатов исследования

Результаты модельных расчетов основных показателей ИП при реализации принятых схем налогообложения показали, что при реализации схемы 2 сумма налоговых поступлений увеличивается на 41 % по сравнению со схемой 1. При этом сни-

Таблица / Table

**Расчетные показатели эффективности инвестиционных проектов в условиях реализации различных налоговых схем /
Estimated indicators of IP efficiency in terms of implementation various tax schemes**

Показатель / Indicator	Единица измер./ Unit of measurement	Схема 1 / Scheme 1	Схема 2 / Scheme 2	Схема 3 / Scheme 3	Схема 4 / Scheme 4
Срок реализации проекта / Project implementation period	Лет / years	13	13	13	13
ЧД / NV	Млрд руб. / Billion rubles	8,1	3,4	8,3	3,9
ЧДД / NPV	Млрд руб. / Billion rubles	2,9	0,12	3,4	0,9
Срок окупаемости инвестиций (дисконтированный срок) / Payback period of investment (discounted)	Лет / Years	5 (6)	6,3 (12,3)	4,3 (4,8)	6 (8)
ВНД / IRR	%	22,9	10,6	28,2	14,9
НДС / (ставка для исчисления) / Production tax (rate for calculation)	Млрд руб. / Billion rubles	5,5 (397 руб/т)	10,9	0	5,4 (4 % от цены)
Налог на прибыль / Income tax	Млрд руб. / Billion rubles	5	3,9	6,1	5,0
Средняя цена 1 т продукции / Average price of 1 ton of product	Тыс. руб. / Thousand rubles	6,32	6,32	6,32	6,32
Средняя себестоимость 1 т продукции / Average cost price of 1 ton of production	Тыс. руб. / Thousand rubles	6,2	6,6	5,8	6,2
НДС (50 % от дохода) / Added income tax (50% income)	Млрд руб. / Billion rubles	-	-	6,2	4,1
Сумма налогов / Amount of taxes	Млрд руб. / Billion rubles	10,5	14,8	12,3	14,5
Дисконтированная сумма налогов / Discounted amount of taxes	Млрд руб. / Billion rubles	5,9	8,6	6,5	7,9

жается экономическая эффективность ИП (ЧДД близок нулю) и увеличивается себестоимость добычи, т. е. схема 2 является фискальной и регрессивной.

При реализации схемы 3 суммарные налоговые отчисления увеличиваются на 17 % по сравнению со схемой 1 за счет роста поступлений от налога на прибыль, так за счет обнуления НДС снижается себестоимость добычи и рентных платежей (НДД выше НДС, исчисленного по схеме 1). При этом сохраняются высокие экономические показатели ИП. Теоретически данная схема представляется прогрессивной и наиболее предпочтительной для недропользователя.

При реализации схемы 4 экономическая эффективность ИП несколько ниже, чем по схеме 1 и схеме 3, но сохраняется на приемлемом уровне (ЧД – 4 млрд руб., ЧДД – 0,9 млрд руб. и ВНД – 15,2 %), а сумма налоговых отчислений увеличивается на 36 % относительно схемы 1. Схема 4 согласуется с целями собственника недр – государства и исключает риски неполучения рентных платежей, которые существуют при реализации схемы 3.

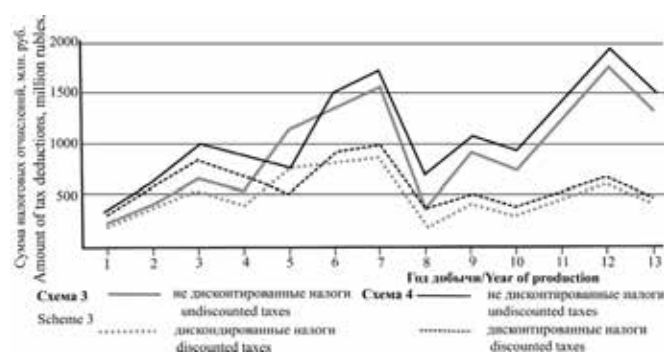


Рис. Динамика ежегодных суммарных налоговых отчислений инвестиционных проектов при реализации схемы 3 и схемы 4

Fig. Dynamics of annual tax deductions of individual entrepreneurs when implementing scheme 3 and scheme 4

Приведенная на рисунке динамика ежегодных дисконтированных и недисконтированных годовых налоговых отчислений в условиях реализации схемы 3 и схемы 4 показывает: до выхода предприятия на рентабельную работу налоговые поступления по схеме 4 ожидаемо значимо выше, чем по схеме 3, а далее – в период стабильной прибыльной работы – различие между ними сокращается. Это позволяет предложить следующую возможную концептуальную схему: до возмещения капитальных вложений налогообложение

осуществлять по схеме НДС. После выхода предприятия на рентабельную работу (ЧДД > 0) переходить на схему НДД. Теоретически такая комбинированная схема позволяет не только повысить эффективность налогообложения, но и может стать дополнительным стимулом для ускоренного выхода предприятия на рентабельную работу.

Предложения и выводы

1. Определены недостатки действующей схемы налогообложения добычи:

- отсутствие нормативно-методической базы по определению и контролю базы налогообложения,
- слабая дифференциация отчислений НДС от рентообразующих факторов. Они предопределяют целесообразность перехода на новую схему.

2. Наиболее эффективной, как показал анализ многочисленных исследований в этой области и мировой опыт налогообложения, является схема, напрямую облагающая дополнительный доход, генерируемый при добыче полезного ископаемого.

3. Исходя из того что горная рента есть «незаработанный» доход, то для ее исчисления должны учитываться рентообразующие факторы (стоимостная ценность товарной продукции, особенности горно-геологических, технических, технологических, географических факторов).

4. Результаты расчетов на финансово-экономической модели денежных потоков реального горного объекта в условиях реализации четырех схем налогообложения позволяют предложить следующую концептуальную комбинированную схему. До выхода предприятия на рентабельную работу исчисление налога на добычу производится по адвалорной ставке, например, 4 % для коксующихся углей и антрацитов и 2 % для остальных углей. При определении налоговой базы (стоимости реализованной продукции) использовать среднюю цену угля, сложившуюся на технологическую марку, в зависимости от направления поставок продукции (на внутреннем или внешнем рынках) без учета затрат на транспорт. Средние цены на технологические марки для исчисления налога публиковать на сайте Минэкономразвития. При выходе предприятия на рентабельную работу платежи осуществлять по схеме НДД.

5. Теоретически реализация такой комбинированной схемы исчисления горной ренты позволит изъять большую часть горной ренты в пользу государства и стимулировать недропользователей к повышению технического уровня процессов добычи угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Стратегия развития минерально-сырьевого базы Российской Федерации до 2050 года. Распоряжение от 11 июля 2024 № 1838-р. [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/news/52250/> (дата обращения: 14.09.2024). [Strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2050. Order No. 1838-r dated July 11, 2024. Moscow, 2024. Available from: <http://government.ru/news/52250/> (In Russ.)].
2. Рост налоговых поступлений в 2023 году едва превысит инфляцию [Электронный ресурс] <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/rost-nalogh-post-2023/> (дата обращения: 05.08.2024). [Tax revenue growth in 2023 will barely exceed inflation. Available from: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/rost-nalogh-post-2023/>].
3. Львов ДС. О формировании системы национального дивиденда. *Вестник университета*. 2001;1(2):5–19. [Lvov D. S. On the formation of the system of national dividend. *Bulletin of the University*. 2001;1(2):5–19 (In Russ.)].
4. Маршавина ЛЯ, Анищенко ВА. Актуальные проблемы налогообложения нефтедобывающей отрасли Российской Федерации. *Изв. Рос. экон. ун-та им. Г. В. Плеханова*. 2012;(3):36–43. [Marshavina LYa, Anishchenko VA. Current problems of taxation of the oil industry of the Russian Federation. *Proceedings of the Russian Economic University named after Plekhanov G. V.* 2012;(3):36–43 (In Russ.)].

5. Кимельман СА. Экономика рентных отношений в современном российском недропользовании. *Записки Горного института*. 2011;191:9–29. [Kimelman S. Economy of rent relations in modern Russian industrial use of subsoil. *Proceedings of the Mining Institute*. 2011;191:9–29 (In Russ.)].
6. Юмаев ММ. Совершенствование налогообложения добычи угля. *Уголь*. 2011;(1):23–27. [Yumaev MM. Improving taxation of coal mining. *Coal*. 2011;1:23–27 (In Russ.)].
7. Чернявский СВ. Недостаток использования НДПИ с плоской шкалой и направления его совершенствования. *Вестник Томского государственного университета*. 2013;370:136–139. [Chernyavskiy SV. Disadvantages of using MET with a flat scale and directions for its improvement. *Bulletin of Tomsk State University*. 2013;370:136–9 (In Russ.)].
8. Чернявский СВ, Шутов ОЛ, Астахова ИА. Проблемы совершенствования механизма изъятия природной ренты в интересах собственника ресурса. *Вестник Томского государственного университета*. 2021;56:119–127. [Chernyavskiy SV, Shutov OL, Astakhova IA. Problems of improving the Mechanism of Natural Rent Extraction in the Interests of the Resource Owner. *Tomsk State University Journal of Economics*. 2021;56:119–127 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17223/19988648/56/9>.
9. Бобылева АЗ, Жаворонкова ЕН, Львова ОА. Оценка моделей налогообложения нефтяного сектора в России и за рубежом. *Вестник Московского университета*. 2015;(5):22–45. [Bobyleva AZ, Zhavoronkova EN, Lvova OA. Assessment of taxation models of the oil sector in Russia and abroad. *Bulletin of the Moscow University*. 2015;5:22–45 (In Russ.)].
10. Шаталов СД, Пинская МР, Прокаев ВА. [и др.] Концепция рентного налогообложения добычи и извлечения твердых полезных ископаемых. *Финансовый журнал*. 2023;15(3):9–24. [Shatlatov SD, Pinskaya MR, Prokaev VA, et al. The Rent Taxation Concept for Solid Minerals Extraction and Recovery. *Financial Journal*. 2023;15(3):9–24 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31107/2075-1990-2023-3-9-24>.
11. Писаренко МВ, Шаклеин СВ. О налоге на добычу угля. Минеральные ресурсы России. *Экономика и управление*. 2023;(1):57–60. [Pisarenko M. V, Shaklein SV. On coal mining tax. Mineral Resources of Russia. *Economics & Management*. 2023;(1):57–60 (In Russ.)].
12. Зуев КН, Рогова ТБ, Шаклеин СВ. Нормативно-правовое обеспечение учета добычи и потерь угля в целях достоверного определения налогооблагаемой базы налога на добычу полезного ископаемого. *Уголь*. 2019;(9):82–87. [Zuev KN, Rogova TB, Shaklein SV. Regulatory support for accounting for coal production and losses in order to reliably determinate tax base of the tax on mining. *Coal*. 2019;9:82–7 (In Russ.)]. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-9-82-87>.
13. Газета «Коммерсантъ» № 24 от 09.02.2024 [Электронный источник] URL: <https://www.kommer-sant.ru/doc/6495840> (дата обращения: 14.03.2024). [Newspaper “Kommersant” No. 24 dated 02.09/2024. Available from: <https://www.kommersant.ru/doc/6495840> (In Russ.)].
14. Белов КО, Игнатенко ЕС. Дифференциал НДПИ и инвестиционная привлекательность инвестиционных проектов в газовой отрасли. *Финансовый журнал*. 2010;(3):79–86. [Belov KO, Ignatenko YeS. The Russian extraction tax differentiation as a factor in making gas production sector projects more attractive for investors. *Financial Journal*. 2010;(3):79–86 (In Russ.)].
15. Александров ГА, Комаров ИС. Рентные отношения и разделение прибыли от добывающей деятельности на ренты и предпринимательский доход. *Экономика в промышленности*. 2017;(3):232–241. [Aleksandrov GA, Komarov IS. Rental relations and profit sharing from extractive activity on rents and entrepreneurial Income. *Economy in the industry*. 2017;3:232–41 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2017-3-232-241>.
16. Тюрин ЮГ, Троянская МА. К вопросу о налогообложении добывающей промышленности. *Азимут научных исследований: экономика и управление*. 2018;3(24):292–298. [Tyurina YG, Troyanskaya MA. To the question of the taxation of the extractive industry. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2018;3(24):292–5 (In Russ.)].
17. Кимельман СА, Андрияшин СА. Экономика рентных отношений в условиях современной России. *Вопросы экономики*. 2005;(2):83–93. [Kimelman SA, Andryushin SA. Economy of the rent relations in the conditions of modern Russia. *Questions of Economy*. 2005;(2):83–9 (In Russ.)].
18. Иванова ЯЯ, Косов МЕ, Балихина НВ. Налогообложение твердых полезных ископаемых в Российской Федерации. Проблемы и пути совершенствования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. 175 с. [Ivanova YaYa, Kosov ME, Balikhina NV, et al. Taxation of solid minerals in the Russian Federation. Problems and ways of improvement. Moscow, 2015 (In Russ.)].
19. Кимельман СА, Андрияшин СВ. Проблемы горной ренты в современной России. *Вопросы экономики*. 2004;(2):30–42. [Kimelman SA, Andryushin SA. Problem of a mountain rent in modern Russia. *Questions of Economy*. 2004;2:30–42 (In Russ.)].
20. Юхимова ЯЯ. Налогообложение добычи твердых полезных ископаемых: мировой и отечественный опыт. *Горный журнал*. 2008;(5):23–28. [Yuhimova YaYa. Taxation of solid minerals extraction: global and domestic experience. *Mining magazine*. 2008;(5):23–8 (In Russ.)].
21. Corporate income taxes, mining royalties and other mining taxes. A summary of rates and rules in selected countries. Jun. 2012. Available from: <https://www.pwc.com/gx/en/energy-utilities-mining/publications/pdf/pwc-gx-mining-taxes-and-royalties.pdf>.
22. Филатова ОЮ. Система дифференцирования ставок налога на добычу угля. *Записки Горного института*. 2009;184:188–194. [Filatova OY. System of differentiated coal extraction tax rates. *Proceedings of the Mining institute*. 2009;184:188–94 (In Russ.)].
23. Петров ТВ, Тихонова ИВ. Концептуальные основы совершенствования элементов налога на добычу полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(10):38–40. [Petrov TV, Tikhonova IV. Conceptual basis for improving the elements of the mineral extraction tax. *Mining informational and analytical bulletin*. 2007;(10):38–40 (In Russ.)].

24. Серов ВМ, Астафьева ОЕ. Обоснование методических подходов к определению природной ренты угольных месторождений. *Уголь*. 2020;(4):37–39. [Serov VM, Astafyeva OE. Substantiation of methodical approaches to determination of natural rent of coal deposits. *Coal*. 2020;(4):37–9 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-4-37-39>.
25. Пансков ВГ. Налогообложение природных ресурсов: проблемы и пути решения. *Этап: экономическая теория, анализ, практика*. 2018;(2):91–104. [Panskov VG. Taxation of natural resources: problems and solutions. *Stage: economic theory, analysis, practice*. 2018;(2):91–104 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.24411/2071-6435-2018-10018>.
26. Уваров ПО, Адаева АА, Алиасхабов ЗА. Последствия введения налога на добавленный доход как составляющая налоговой реформы нефтяной отрасли на примере Южно-Киринского месторождения [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberle-ninka.ru/article/n/posledstviyavvedeniya-naloga-na-dobavlennyy-dohod-kak-sostavlyayuschayanalogovoy-reformy-neftyanoy-otrasli-na-primere-yuzhno> (дата обращения: 27.04.2024). [Uvarov PO, Adaeva AA, Aliashabov ZA. Consequences of the introduction of an added income tax as a component of the tax reform of the oil industry using the example of the Yuzhno-Kirinskoye field. Available from: <https://cyberleninka.ru /article/n/posledstviya-vvedeniya-naloga-na-dobavlennyy-dohod-kak-sostavlyayuschaya-nalogovoy-reformy-neftyanoy-otrasli-na-primere-yuzhno> (In Russ.)].
27. Батутина НС. Анализ и совершенствование налогообложения при добыче твердых полезных ископаемых в республике САХА (Якутия). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(6):64–71. [Batugina NS. Analysis and improvement of taxation in the extraction of solid minerals in the Republic of SAKHA (Yakutia). *Mining information and analytical bulletin*. 2010;(6):64–71 (In Russ.)].
28. Каукин АС, Миллер ЕМ. Налоговый маневр в нефтяной отрасли: промежуточные итоги и риски дальнейшей реализации. *Вопросы экономики*. 2020;(10):28–43. [Kaukin AS, Miller EM. Tax maneuver in the oil industry: Provisional results and risks for further implementation. *Ekonomik issues*. 2020;(10):28–43 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2020-10-28-43>.
29. Шевченко ИВ, Коробейникова МС. Налоговая реформа в нефтегазовой отрасли России. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2018;14(10):1845–1871. [Shevchenko IV, Korobeinikova MS. Tax Overhaul in the Oil and Gas sector of Russia. *National Interests: Priorities and Security*. 2018;14(10):1845–71. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.24891/ni.14.10-1845>.
30. Дьячков ГС. Сравнительный анализ эффективности налоговых режимов в нефтедобыче. *Учет. Анализ. Аудит*. 2022;9(3):39–51. [Dyachkov GS. Comparative analysis of tax regimes effectiveness in oil production. *Accounting. Analysis. Auditing*. 2022;9(3):39–51 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.26794/2408-9303-2022-9-3-39-51>.
31. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Утверждено Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ 21.06.1999 № ВК477 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634> (дата обращения: 27.07.2024). [Methodological recommendations for assessing the effectiveness of investment projects. Approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation and the State Construction Committee of the Russian Federation on June 21, 1999 No. VK477. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634> (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Марина Владимировна Писаренко —

д-р тех. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры маркшейдерского дела и геологии Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация, ORCID 000-0003-0056-1437, e-mail: iu.kemsc@mail.ru

Владимир Валерьевич Аксенов —

д-р тех. наук, и. о. директора Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация, ORCID 0000-0003-4642-2578, e-mail: 55vva42@mail.ru

Сергей Васильевич Шаклеин —

д-р тех. наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация, ORCID 0000-0001-8421-6770, e-mail: svs1950@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Marina V. Pisarenko -

Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; professor at the Department of Surveying and Geology, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation, ORCID 000-0003-0056-1437, e-mail: iu.kemsc@mail.ru

Vladimir V. Aksenov -

Dr. Sci. (Eng.), Acting Director of the Coal Institute, The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation, ORCID 0000-0003-4642-2578, e-mail: 55vva42@mail.ru

Sergey V. Shaklein -

Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation, ORCID 0000-0001-8421-6770, e-mail: svs1950@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕФЛАГРИРУЮЩЕГО СОСТАВА ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ КУСКОВ ПОРОДЫ ГОРНОЙ МАССЫ

И. В. Корнеев, Ал. А. Галимьянов, В. И. Мишнев, Е. Н. Казарина

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук,
обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Аннотация: В целях оценки эффективности газогенерирующих пиротехнических составов в настоящей статье приведено исследование качества дробления негабаритных кусков породы на карьере методом дефлаграции. Исследование направлено на совершенствование процесса вторичного дробления на горных предприятиях. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по дроблению негабаритных кусков породы с использованием дефлагрирующего состава «Энамат», когда для сравнительного анализа эффекта поршневого действия газообразных продуктов дефлаграции в шпуре в качестве забойки применялись различные параметры и материалы забойки. Результаты исследования могут быть полезными при вторичном дроблении негабаритных кусков пород на карьерах.

Ключевые слова: дефлагрирующий состав, негабаритные куски породы, забоечный материал, дробление, шпуровой метод

Для цитирования: Корнеев И. В., Галимьянов Ал. А., Мишнев В. И., Казарина Е. Н. Эффективность применения дефлагрирующего состава для дробления негабаритных кусков породы горной массы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 75-80. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_75_80.

THE EFFECTIVENESS OF USING A DEFLAGRATING COMPOUND FOR CRUSHING OVERSIZED PIECES OF ROCK

I. V. Korneev, Al. A. Galimyanov, V. I. Mishnev, E. N. Kazarina

Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division
of the KHFIC FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

Abstract: In order to evaluate the effectiveness of gas-generating pyrotechnic compositions, this article presents a study of the quality of crushing oversized pieces of rock in a quarry by deflagration. The research is aimed at improving the process of secondary crushing in mining enterprises. This paper presents the results of experiments on crushing oversized pieces of rock using the deflagrating composition «Enamat», when various parameters and materials of the slaughtering were used for a comparative analysis of the piston effect of gaseous deflagration products in the hole. The results of the study may be useful in the secondary crushing of oversized pieces of rocks in quarries.

Keywords: deflagrating composition, oversized pieces of rock, face material, crushing, borehole method

For citation: Korneev I. V., Galimyanov Al. A., Mishnev V. I., Kazarina E. N. The effectiveness of using a deflagrating compound for crushing oversized pieces of rock. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):75-80. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_75_80.

Введение

Современные технологии ведения буровзрывных работ обеспечивают эффективное разрушение горного массива при соблюдении определенных условий, однако не обходится без выхода негабаритных кусков горной массы, которые далее необходимо подвергать вторичному дроблению. Существуют разные способы вторичного дробления горной породы, такие как метод накладных (наружных), шпуровых и кумулятивных зарядов [1]; технология разрушения негабаритных кусков породы путем бурения одиночных шпуров с заполнением их пластичным веществом и размещением

в них металлических цилиндрических штанг с оголовками, по которым наносятся одиночные удары [2]; дробление негабаритов методом электроразрядного эффекта, заключающимся в направленном действии ударных волн и высоком импульсном давлении, создаваемом при мощных электрических разрядах жидкости [3]; импульсный механический способ с использованием гидроударников [4] и др. [5–8].

К одному из альтернативных и перспективных направлений осуществления вторичного дробления горных пород и строительных неметаллических конструкций следует отнести метод дробления с использованием дефлаграционных

составов типа «Энамат» [9], относящихся к пиротехническим составам (конкретнее термитным). Как известно, дефлаграция [10] — это процесс дозвукового горения, при котором образуется быстро перемещающаяся зона (фронт) химических превращений. Передача энергии от зоны реакции в направлении движения фронта происходит преимущественно за счет конвективной теплопередачи. Принципиально отличается от детонации, при которой зона превращений распространяется со сверхзвуковой скоростью и передача энергии происходит за счет разогрева от внутреннего трения в веществе при прохождении через него продольной волны (ударная волна в детонационном процессе). Следует отметить, что без качественной забойки заряда с дефлаграционным материалом дробление чего-либо не произойдет в отличие от работы заряда со взрывчатым веществом (ВВ) [11, 12].

Цель исследований: определение эффективности применения дефлагрирующего состава для дробления негабаритных кусков породы горной массы.

Материал и методы исследования

В 2022 году на базе ИГД ДВО РАН были проведены исследования дробления бетонных конструкций [13] с применением дефлагрирующего патрона «Энамат». Опытным путем подтверждено, что наилучшее дробление с применяемым составом «Энамат» происходит при использовании забоечного материала, обеспечивающего наибольшее сцепление забойки со стенками шпура.

Для оценки дробления негабаритных кусков горной породы на карьерах общераспространенных полезных ископаемых Хабаровского края в 2023 году специально подготовленными (аттестованными, имеющими право производства и руководства взрывными работами) сотрудниками ИГД продолжено экспериментальное исследование эффективности применения дефлагрирующего состава типа «Энамат» (рис. 1). В качестве забоечного материала для одних зарядов использовалась жирная глина, а для других зарядов специальный материал «Пенетрон» — проникающая гидроизоляция, представляющая собой сухие смеси на основе специальных цементов, кварцевого песка определенной granulometрии и активных химических добавок (рис. 2).

На карьере «Краснореченский» на начальном этапе осуществлялось производство бурения шпуров диаметром 45 мм глубиной от 300 до 800 мм с использованием перфоратора BOSCH (рис. 3, 4) таким образом, чтобы забой (дно) шпура располагался примерно по центру негабаритных кусков горной породы (рис. 5, 6), похожих по габаритам — $2,5 \times 1,5 \times 1$ м (рис. 6), из расчета один шпуровой заряд на один негабарит.



Рис. 1. Патрон «Энамата» и электроспичка
Fig. 1. The «Enamata» cartridge and the electric match



Рис. 2. Материал для забойки «Пенетрон»
Fig. 2. The material for the face Penetron



Рис. 3. Процесс бурения шпура
Fig. 3. The process of drilling a hole



Рис. 4. Панорама негабаритов
Fig. 4. Panorama of oversized

Вслед за бурением формировался шпуровой заряд (рис. 5). При этом для оценки наилучшего запирающего эффекта продуктов дозвукового горения активная часть всех зарядов была одинаковая по высоте – 0,2 м и массе патрона «Энамата» – 50 г, а неактивная часть представляла собой забойку, отличную по высоте и применяемому материалу («Пенетрон», жирная глина) для разных зарядов.

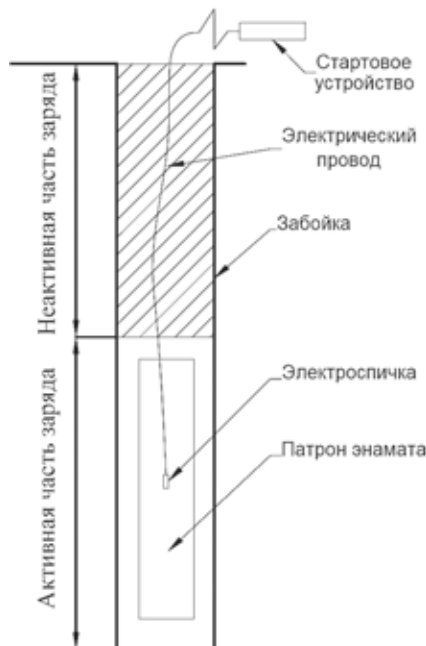


Рис. 5. Конструкция шпурового заряда
Fig. 5. The design of the core charge

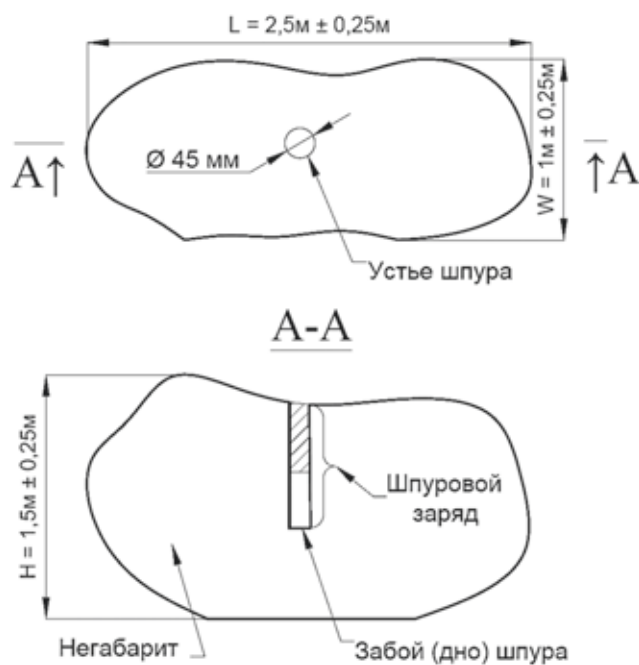


Рис. 6. Расположение шпура в негабарите
Fig. 6. The location of the hole in the oversized

По факту формирования шпурового заряда производилось его иницирование из укрытия. Далее осуществлялась оценка гранулометрического состава раздробленного негабарита линейным методом (рис. 7). После чего отбирались образцы для определения на крепость по шкале проф. Протодяконова [14] в лаборатории ИГД.

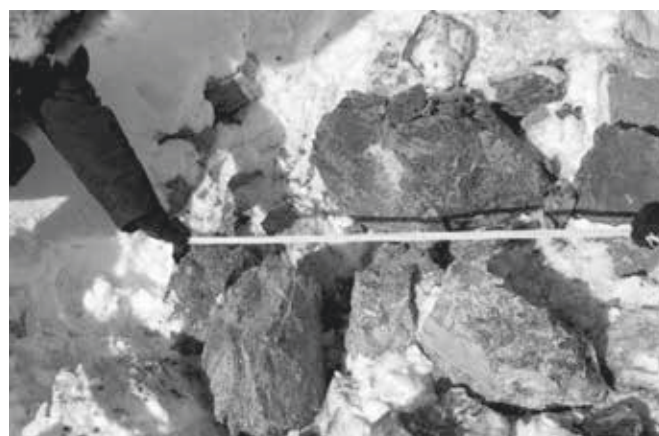


Рис. 7. Измерение гранулометрического состава раздробленного негабарита
Fig. 7. Measurement of the granulometric composition of the fragmented oversized

Результаты дробления негабаритов на карьере «Красно-реченский» представлены в таблице и на рисунке 8.

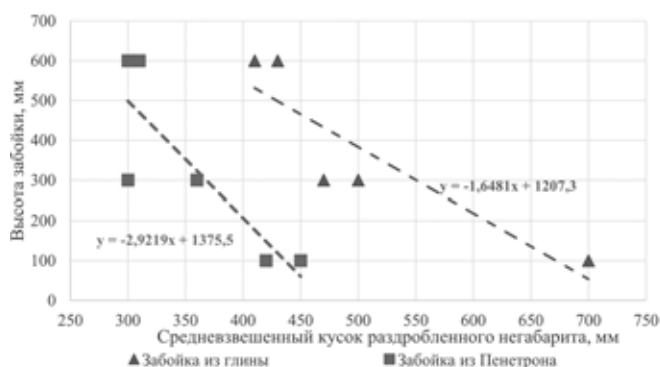


Рис. 8. График зависимости средневзвешенного куска раздробленного негабарита от высоты столба забойки

Fig. 8. Graph of the dependence of the weighted average piece of fragmented oversized on the height of the face post

Средневзвешенный кусок раздробленного негабарита определялся по формуле

$$\frac{c_1 d_{cp1} + c_2 d_{cp2} + c_3 d_{cp3} + \dots + c_n d_{cpn}}{c_1 + c_2 + c_3 + \dots + c_n}$$

где $d_{cp1}, d_{cp2}, d_{cp3}, \dots, d_{cpn}$ – средние размеры кусков каждой фракции;

$c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ – процентное содержание каждой фракции негабарита.

Зависимость качества дробления негабаритных кусков от параметров заряда
Dependence of the crushing quality of oversized pieces on the charge parameters

№ негабарита / № oversized	Параметры негабарита L/W/H, м (±0,25м) / Oversized parameters L/W/H, m (±0,25 m)	Глубина шпура, мм / Hole depth, mm	Высота столба активной части заряда, мм / Height of the column of the active part of the charge, mm	Высота столба забойки, мм / The height of the face post, mm	Средне-взвешенный кусок раздробленного негабарита, мм / Weighted average piece of fragmented oversized, mm	Крепость породы по Протодяконову / The fortress of the breed according to Protodyakonov
С применением забойки из жирной глины / With the use of a fat clay face						
1	2,5/1,0/1,5	300	200	100	–	7
2	2,5/1,0/1,5	300	200	100	700	8
3	2,5/1,0/1,5	500	200	300	500	8
4	2,5/1,0/1,5	500	200	300	470	7
5	2,5/1,0/1,5	800	200	600	430	7
6	2,5/1,0/1,5	800	200	600	420	7
С применением забойки из «Пенетрона» / With the use of a punch from the "Penetron"						
1	2,5/1,0/1,5	300	200	100	450	7
2	2,5/1,0/1,5	300	200	100	430	7
3	2,5/1,0/1,5	500	200	300	360	8
4	2,5/1,0/1,5	500	200	300	330	7
5	2,5/1,0/1,5	800	200	600	300	7
6	2,5/1,0/1,5	800	200	600	310	8

Результаты исследований

Анализ проведенных исследований подтвердил возможность применения и совершенствования альтернативного – дефлаграционного способа дробления негабаритных кусков относительно традиционного взрывного метода.

Основное преимущество представленного в данной работе метода заключается в том, что дефлаграционный состав не является взрывчатым веществом, потому что скорость горения данного состава не превышает скорость звука в соответствующей среде. Поэтому к «Энамату» предъявляются менее жесткие бюрократические требования, чем к ВВ.

В результате проведения экспериментов зафиксировано, что на улучшение качества дробления негабарита влияют следующие основные факторы:

- увеличение высоты столба забойки;
- применение забоечного материала типа «Пенетрон», создающего наибольший запирающий эффект продуктов дефлаграции в шпуре и обладающего возможностью быстро (до 5 минут) застывать, создавая максимальное сцепление забойки со стенками шпура.

Однако считаем важным и необходимым рекомендовать осуществлять обращение с дефлаграционным составом только обученному персоналу с оформлением соответствующей документации (проект и т. п.), по аналогии с пунктами федеральных норм и правил [15].

Целесообразно продолжить уточняющие исследования в

данном направлении по обоснованию актуальности приведенного метода, а именно в части:

- анализа качества дробления негабаритных кусков при изменении параметров (диаметр и глубина шпура, конструкция заряда, количества шпуров, сетки бурения, материал для забойки и т. д.), при разных физико-механических свойствах горных пород;
- проведения технико-экономического обоснования при сопоставлении альтернативного способа дробления и взрывного и механического способов;
- определения разлета отдельных кусков;
- уточнения других фактов, не предусмотренных текущим исследованием.

Выводы

1. В статье приведено исследование качества дробления негабаритных кусков породы на карьере методом дефлаграции.
2. В работе приводятся результаты экспериментов по дроблению негабаритных кусков породы с использованием дефлагрирующего состава «Энамат», когда для сравнительного анализа эффекта поршневого действия газообразных продуктов дефлаграции в шпуре в качестве забойки применялись различные параметры и материалы забойки.
3. Результаты исследования могут быть полезными при вторичном дроблении негабаритных кусков пород на карьерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кутузов БН. Методы ведения взрывных работ. М.: Горная книга, 2009. С. 388. [Kutuzov BN. Methods of conducting blasting operations. Moscow, 2009 (In Russ.).]
2. Цыганков ДА. Новая технология дробления негабаритов крепких горных пород на карьере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(1):357–362. [Tsygankov DA. A new technology for crushing oversized hard rocks at a quarry. *Mining information and analytical bulletin*. 2006;(1):357-62 (In Russ.).]

3. Гриник АВ. Выбор рациональной технологии дробления негабаритов в условиях железорудного карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(2):68–69. [Grinik AV. The choice of rational technology for crushing oversized rocks in an iron ore quarry. *Mining information and analytical bulletin*. 2000;(2):68-9 (In Russ.)].
4. Назаров ПИ, Левковский ГЛ. Технология направленного раскола крупных отдельностей и дробления негабаритов электроразрядным методом на карьерах природного камня. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(9):129. [Nazarov PI, Levkovski GL. Technology of directional splitting of large separations and crushing of oversized rocks by the electric discharge method in natural stone quarries. *Mining information and analytical bulletin*. 2000;(9):129 (In Russ.)].
5. Иванов СЛ, Шешукова ЕИ, Недашковская ЕС. Классификация средств разрушения негабарита при ведении открытых горных работ. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023;19:138–143. [Ivanov SL, Sheshukova EI, Nedashkovskaya ES. Classification of oversized destruction tools in open-pit mining. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023;19:138-43 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-138-143>.
6. Плащинский ВА. Обоснование и выбор схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов с увеличенной энергией удара: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. – 140 с. [Plaschinsky VA. Justification and choice of schematic and constructive solutions for crushing oversized rocks with increased impact energy: dissertation for the degree of candidate of Technical Sciences. Saint Petersburg, 2022 (In Russ.)].
7. Baranov EG, Klochko II, Oberemok ON. Crushing oversize fragments by means of external charges. *Soviet Mining Science*. 1980;16(1):22-6.
8. Тарасов СП, Тарасов ПИ, Хазин МЛ. Мобильный локализатор для разрушения негабаритов. *Горная промышленность*. 2021;(1):105–109. [Tarasov SP, Tarasov PI, Khazin ML. Mobile localizer for the destruction of oversized objects. *Mining industry*. 2021;(1):105-9 (In Russ.)]. <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-105-109>.
9. Пат. № 2660862 С1 Российская Федерация, МПК C06B 29/04, C06B 33/06. Термитный состав для разрушения негабаритных кусков горных пород и неметаллических строительных конструкций / И. Г. Березин, П. А. Брагин, С. А. Горинов, И. Ю. Маслов. № 2017146202; заявл. 27.12.2017; опубл. 10.07.2018 [Patent No. 2660862 C1 Russian Federation, IPC C06B 29/04, C06B 33/06. Thermite composition for the destruction of oversized pieces of rocks and non-metallic building structures: No. 2017146202: application. 27.12.2017: publ. 10.07.2018 / I. G. Berezin, P. A. Bragin, S. A. Gorinov, I. Y. Maslov (In Russ.)].
10. Дефлаграция [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 07.03.2024). [Deflagration. Available from: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (In Russ.)].
11. Казарина ЕН, Галимьянов АА, Мишнев ВИ, Плотников АЮ. Обоснование эффективности применения забойки на карьере «Маломырский рудник». *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023;(4):413–423. [Kazarina EN, Galimyanov AA, Mishnev VI, et al. Justification of the effectiveness of the use of a face at the Malomyrsky mine quarry. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2023;(4):413-23 (In Russ.)].
12. Галимьянов АА, Плотников АЮ, Казарина ЕН, Мишнев ВИ. Эффективность применения забойки на карьере «Маломырский рудник». *Горный журнал*. 2024;(6):61–64. [Galimyanov AA, Plotnikov AYU, Kazarina EN. Effectiveness of the application of the face at the Malomyrsky mine quarry. *Mining Journal*. 2024;6:61-4 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.06.09>.
13. Казарина ЕН, Галимьянов АА, Рассказова АВ, Мишнев ВИ. Эффективность применения забойки на примере разрушения бетонных конструкций методом дефлаграции. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023;(1):456–462. [Kazarina EN, Galimyanov AA, Rasskazova AV. Effectiveness of the face on the example of the destruction of concrete structures by deflagration. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2023;(1):456-62 (In Russ.)].
14. ГОСТ 21153.1-75 Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодюкову [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023972> (дата обращения: 01.03.2024). [GOST 21153.1-75 Mountain rocks Method for determining the strength coefficient according to Protodyakonov. It was put into effect by the resolution of the State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR dated September 25, 1975 N 2491: date of introduction 1976-07-01. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200023972> (In Russ.)].
15. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573219717> (дата обращения: 16.03.2024). [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for the production, storage and use of explosive materials for industrial purposes." item 779. As amended by Rostekhnadzor Order No. 171 dated 05/25/2022. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/573219717> (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь Владимирович Корнеев – инженер, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, лаборатория дробления горных пород, г. Хабаровск, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Korneev – Engineer, Institute of Mining of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the KHFIC FEB RAS, Rock crushing laboratory, Khabarovsk, Russian Federation

Алексей Алмазович Галимьянов —

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела Дальневосточного отделения
Российской академии наук, обособленное подразделение ХФИЦ
ДВО РАН, лаборатория дробления горных пород, г. Хабаровск,
Россия

Владимир Игоревич Мишнев —

младший научный сотрудник, Институт горного дела
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, лаборатория
дробления горных пород, г. Хабаровск, Россия, e-mail:
vovchenskiy@cf@gmail.com

Елизавета Николаевна Казарина —

младший научный сотрудник, Институт горного дела
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, лаборатория
дробления горных пород, г. Хабаровск, Россия

Alexey A. Galimyanov —

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Institute of Mining of the
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate
division of the KHFIC FEB RAS, Rock crushing laboratory,
Khabarovsk, Russian Federation

Vladimir I. Mishnev —

Junior researcher, Institute of Mining of the Far East Branch
of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the
KHFIC FEB RAS, Rock crushing laboratory, Khabarovsk, Russian
Federation, e-mail: vovchenskiy@cf@gmail.com

Elizaveta N. Kazarina —

Junior researcher, Institute of Mining of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the
KHFIC FEB RAS, Rock crushing laboratory, Khabarovsk, Russian
Federation

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of every one of the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

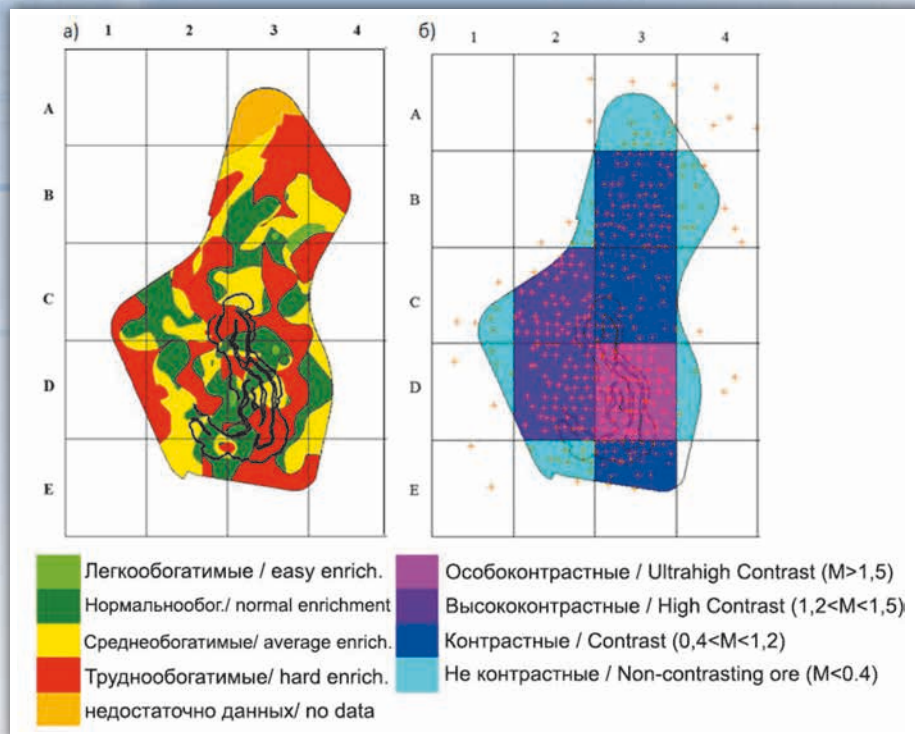


Рис. 2. Районирование титаномагнетитовых руд на гор. +160 м Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК»: а) по комплексному показателю обогащенности (содержанию железа в магнитной фракции проб и размера вкрапленности); б) по показателю контрастности
Fig. 2. Zoning of titanomagnetite ores at the +160 m mountain of the Northern Open-pit of EVRAZ KGOK: a) according to the complex indicator of enrichment (iron content in the magnetic fraction of samples and the size of the inclusions); b) according to the contrast indicator

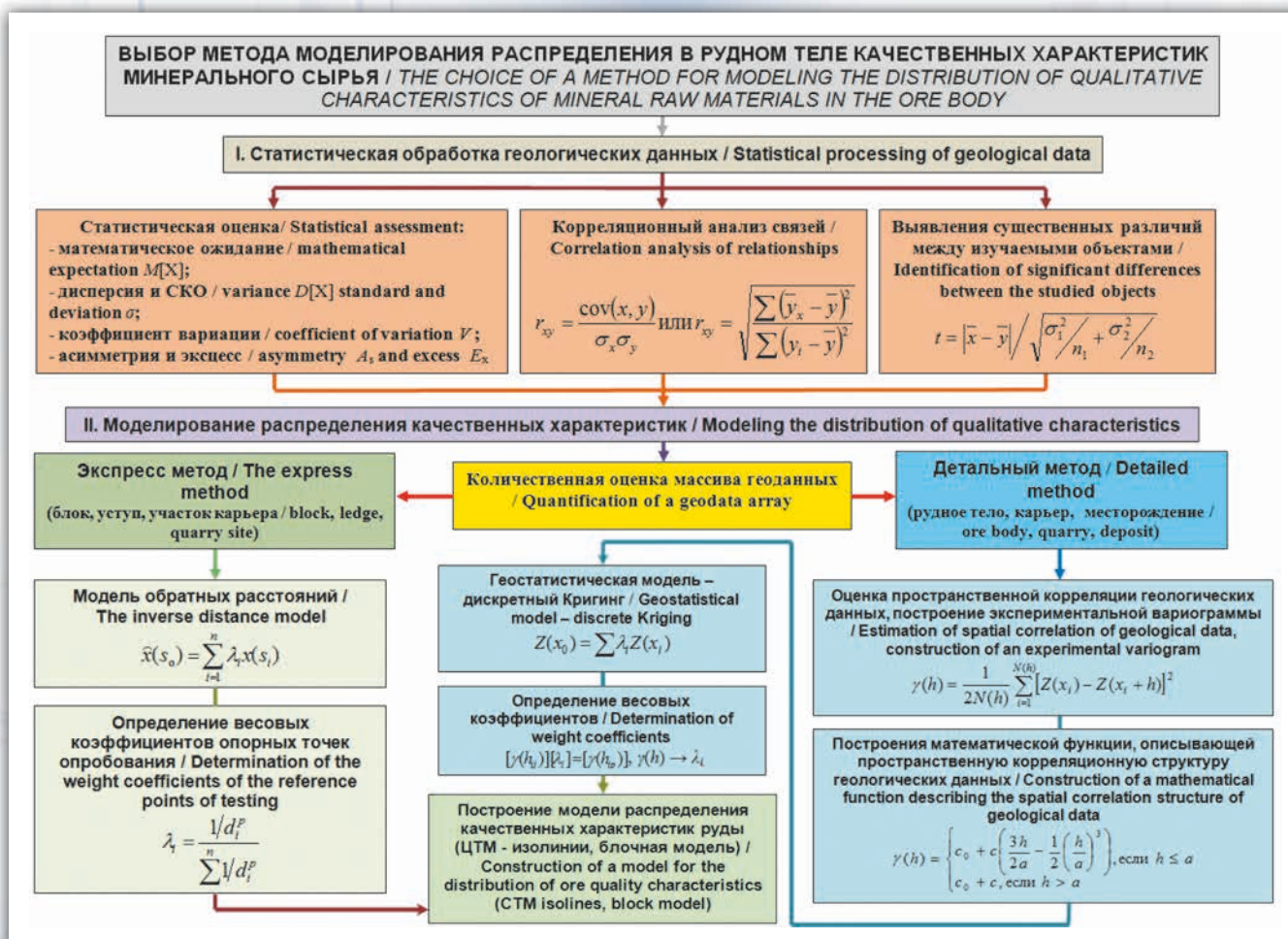


Рис. 4. Блок-схема выбора метода геоинформационного моделирования качественных характеристик руд
Fig. 4. Block diagram of the choice of the method of geoinformation modeling of the qualitative characteristics of ores

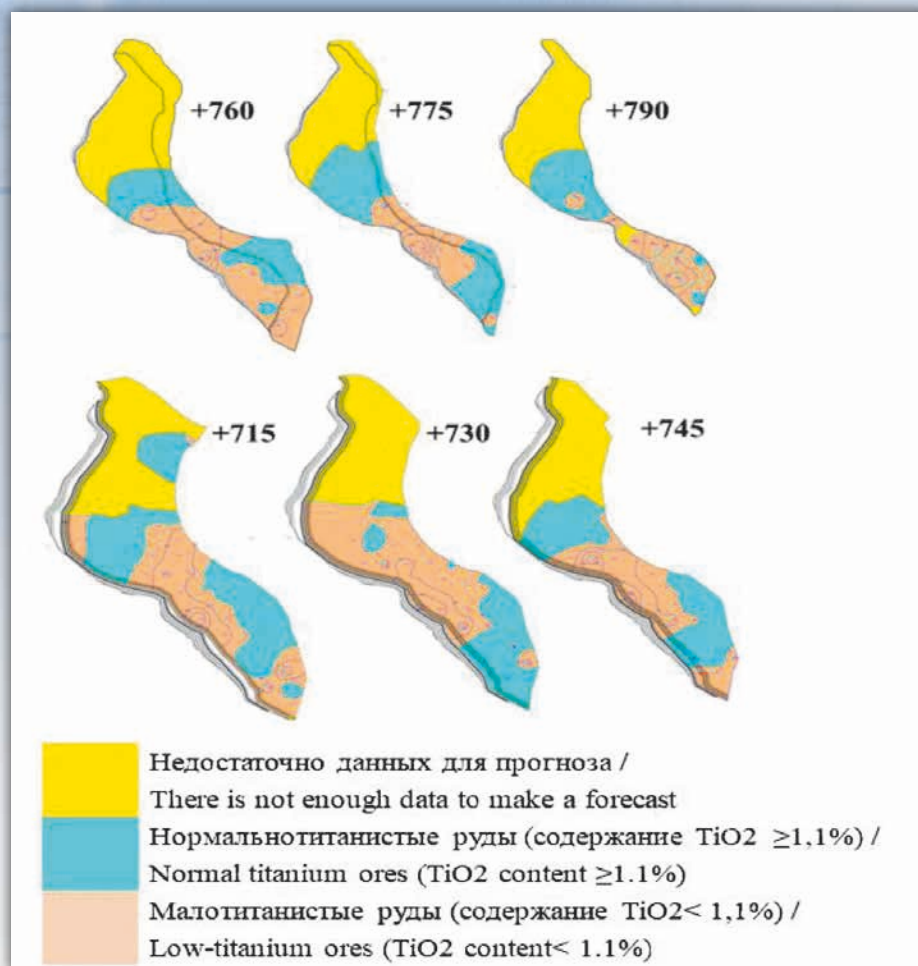


Рис. 6. Динамика распределения технологических типов руд по содержанию TiO_2 перспективного карьера Собственно-Качканарского месторождения титаномagnetитов по проектным горизонтам

Fig. 6. Dynamics of the distribution of technological types of ores according to the TiO_2 content of the promising quarry of the Kachkanarskytitanomagnetite deposit proper by design horizons

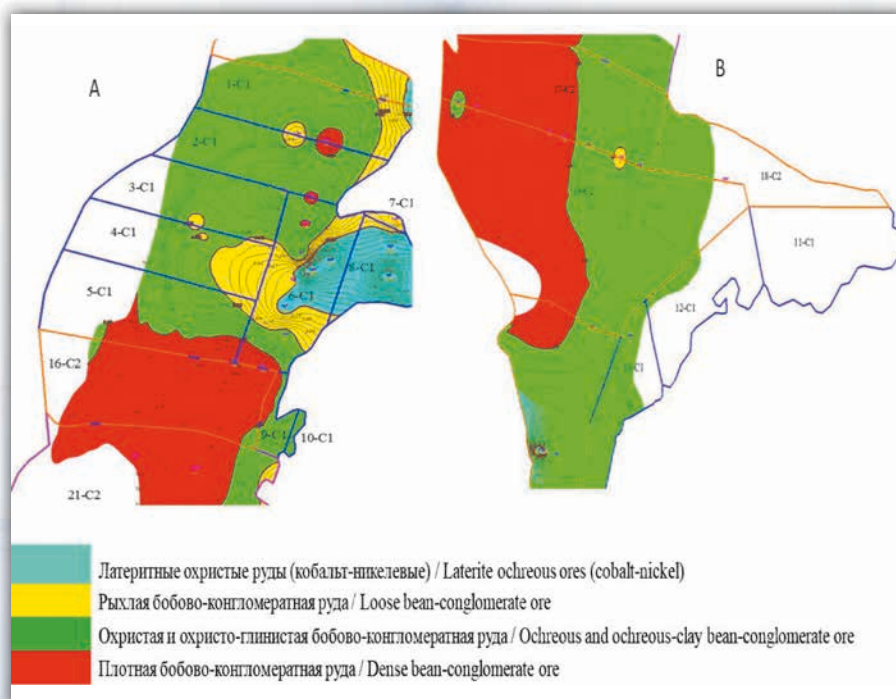


Рис. 7. Распределение типов комплексных руд на гор. +40 м в пределах границ блоков подсчета запасов Серовского месторождения: а) Северный участок; в) Южный участок

Fig. 7. Distribution of types of complex ores on mountains. +40 m within the boundaries of the blocks of calculation of reserves of the Serov deposit: a) The Northern section; b) The Southern section

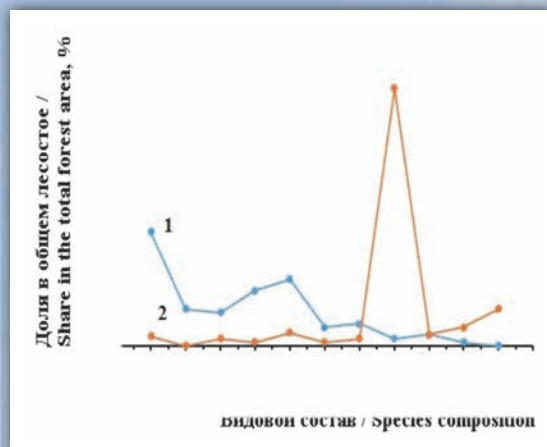


Рис. 1. Видовая структура эталонного (1) и измененного (2) фитоценоза в экосистеме долинных лесов в зоне влияния подземного рудника с совмещенной жилой инфраструктурой

Fig. 1. The species structure of the reference (1) and modified (2) phytocenosis in the ecosystem of valley forests in the zone of influence of an underground mine with a combined residential infrastructure

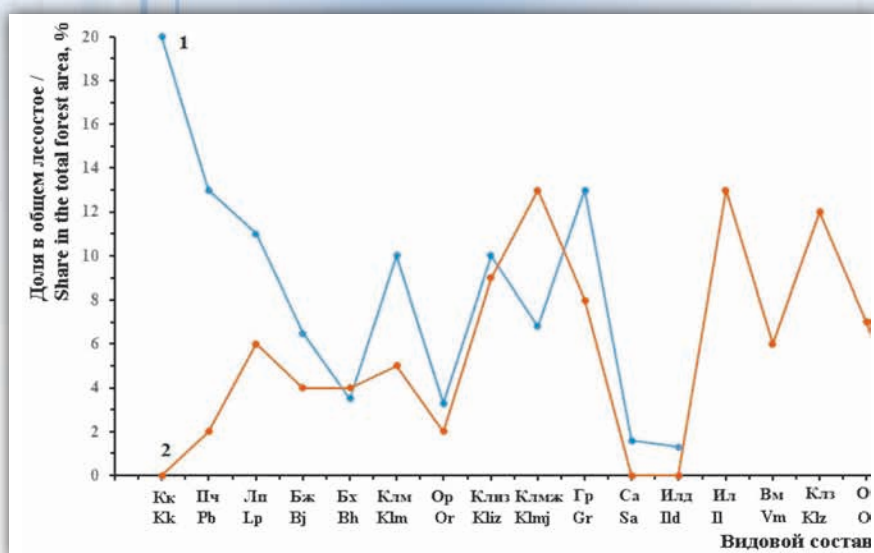


Рис. 2. Видовая структура эталонного (1) и вторичного (2) фитоценоза хвойно-широколиственных лесов в зоне влияния подземного рудника с совмещенной жилой структурой: Бш – береза Шмидта; Бм – береза маньчжурская; Вм – вишня Максимовича; Дм – диморфант; Клз – клен ложнозибольдов; Мк – мелкоплодный; Ос – осина обыкновенная

Fig. 2. Species structure of the reference (1) and secondary (2) phytocenosis of coniferous-deciduous forests in the zone of influence of an underground mine with a combined residential structure: Bs – Schmidt birch; Bm – Manchurian birch; Vm – Maksimovich cherry; Dm – Dimorphant; Klz – False-bold maple; Mk – Small-fruited; Os – Common aspen

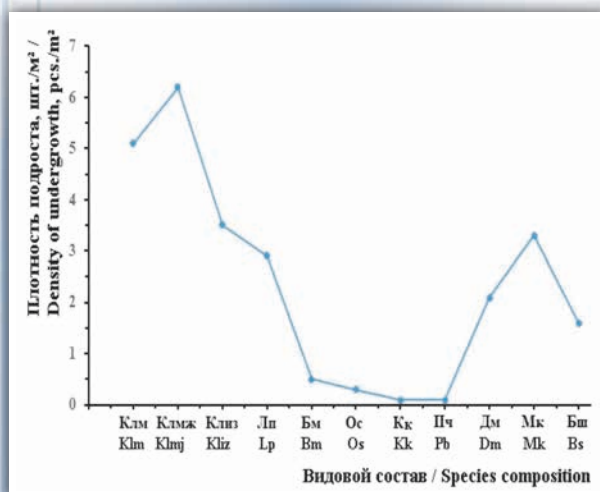


Рис. 3. Динамика плотности подроста видов вторичного фитоценоза лиственных лесов

Fig. 3. Dynamics of undergrowth density of species of secondary phytocenosis of deciduous forests

СТАЛКЕР 80-24, 15-24

КОМПЛЕКС ТРАССОПОИСКОВЫЙ

ПРИЕМНИК ПТ-24

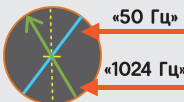
- GPS-выноска подземных трасс с последующим наложением на карту;
- встроенный GPS/ГЛОНАСС модуль;
- высокоточное позиционирование (до 1 см.) совместно с RTK-планшетом PrinCe LT700H;
- использование смартфона вместо внешнего GPS-трекера.



ФУНКЦИЯ «КОМПАС» С РЕЖИМОМ «ВТОРАЯ ЛИНИЯ»

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

- Время работы – до 20 часов;
- увеличенный, сверхъяркий цветной дисплей;
- диапазон рабочих температур: от -30 до +55 °C.



ГЕНЕРАТОР ГТ-80

- Мощность и ток до 80 Вт, 12 А;
- фиксированные частоты генератора: 273, 526, 1024, 8928, 32768 Гц;
- выбор произвольной частоты от 300 до 10000 Гц для работы с приемниками других производителей;
- дистанционное управление генератором через сеть GSM;
- отложенный старт;
- встроенный индуктор обеспечивает наведение сигнала 33 кГц в линию с поверхности земли;
- бесконтактная подача сигнала при помощи передающих клещей КИ-50 или КИ-100;
- встроенный аккумулятор;
- совместим со всеми приемниками серии «Сталкер».

ГЕНЕРАТОР ГТ-15

- Мощность 10 Вт;
- встроенный индуктор для бесконтактной подачи сигнала в коммуникацию.

Локализация и диагностика подземных коммуникаций

RTK планшет



РАДИО-СЕРВИС

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

на правах
рекламы



ДВИЖЕМ ЭВОЛЮЦИЮ
ГОРНЫХ РАБОТ

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

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

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

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



К ОЦЕНКЕ УСЛОВИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ОБВОДНЕННЫХ ПОРОД

Б. В. Хохлов

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела» (РАНИМИ), г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: В статье дана оценка условий эффективного упрочнения пород для безремонтного поддержания горной выработки, расположенной в обводненном массиве, при креплении ее наиболее распространенной трехзвенной арочной металлической крепью. Определен диапазон глубин и прочностных характеристик горных пород, при которых их упрочнение эффективно. Получен показатель коэффициента упрочнения пород, характеризующий необходимость снижения смещений пород в выработку в тех или иных условиях. Дана оценка эффективности упрочнения пород для обеспечения устойчивости горных выработок, чтобы исключить случаи, когда упрочнение пород не эффективно.

Ключевые слова: обводненный массив горных пород, глубина выработки, сопротивление пород сжатию, упрочнение

Для цитирования: Хохлов Б. В. К оценке условий эффективности упрочнения обводненных пород. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 85-88. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_85_88.

TO ASSESS THE CONDITIONS FOR THE EFFECTIVENESS OF HARDENING WATERED ROCKS

B. V. Khokhlov

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

Abstract: The article provides an assessment of the conditions for effective rock hardening for the continuous maintenance of a mine work located in a watered massif, while fastening it with the most common three-link arched metal fastener. The range of depths and strength characteristics of rocks at which their hardening is effective is determined. An indicator of the rock hardening coefficient was obtained, characterizing the need to reduce the displacement of rocks into production under certain conditions. An assessment of the effectiveness of rock hardening to ensure the stability of mine workings is given in order to exclude cases when rock hardening is not effective.

Keywords: watered rock mass, depth of excavation, rock resistance to compression, hardening

For citation: Khokhlov B. V. To assess the conditions for the effectiveness of hardening watered rocks. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):85-88. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_85_88.

Введение

Как показывает практика, традиционные средства охраны горных выработок, особенно на больших глубинах в обводненных массивах, не всегда обеспечивают безремонтное их поддержание. Работы по упрочнению пород вокруг горных выработок в некоторых случаях позволяют достичь нужного эффекта, хотя проводятся они без должного прогноза эффективности. Результаты проведенного упрочнения массива горных пород вокруг выработки оцениваются по снижению смещений пород на контуре выработки (в абсолютных величинах или в процентах от данных, полученных на контрольных и экспериментальных участках) и принимаются в качестве показателей эффектив-

ности осуществляемых мероприятий, т.е. сначала производится упрочнение горных пород, вкладываются определенные средства, а потом может оказаться, что упрочнение не дало желаемого результата. Правомерность использования таких показателей требует более детальной проработки так как необходим определенный прогноз эффективности подобных мероприятий.

При многократной подработке фильтрационные свойства обводненного деформируемого массива изменяются, и вредные вещества из полигонов ТБО могут попасть в водоносные горизонты, питающие населенные пункты и горные выработки [1]. Единого решения этой проблемы пока нет. Каждая конкретная ситуация требует отдельного подхода,

и поэтому исследования в данном направлении весьма актуальны.

Целью исследования является определение условий, при которых упрочнение горных пород будет приводить к снижению величин смещений пород на контуре выработки.

Объект исследования: процессы деформирования горных пород в горную выработку при упрочнении.

Материал и методы

В работе применялся аналитический метод исследования процессов деформирования горных пород в горную выработку.

На рисунке (Fig.) приведены графики определяющие условия безремонтного поддержания (кривая 1) и одноразового перекрепления выработок (кривая 2), которые соответствуют ожидаемым смещениям пород в выработках, расположенных в массиве [2, 3], при креплении их наиболее распространенными трехзвенными металлическими арками.

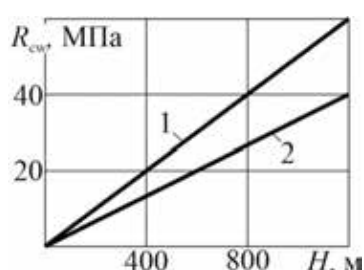


Рис. График условий поддержания выработок: 1 — условия безремонтного поддержания; 2 — условия одноразового перекрепления

Fig. Schedule of conditions for maintaining workings: 1 — maintenance that does not require repair; 2 — one-time repairs

Указанные графики можно представить следующим выражением (1):

$$H = a \cdot R_c, (1)$$

где H — глубина расположения горной выработки, м; a — коэффициент, имеющий для кривых 1 и 2 такие значения: $a_1 = 20$ и $a_2 = 30$; R_c — расчетное сопротивление пород массива сжатию, МПа. Для выработок, расположенных в глинистых породах и глинах (например, в Подмосковном угольном бассейне), величину R_c нужно корректировать умножением на коэффициент влияния естественной влажности и степени пластичности пород k_w , определяемый из выражения (2):

$$k_w = \frac{(W_T - W_e)}{(W_T - W_n)} \cdot (2)$$

где W_T — предел текучести пород, %; W_n — предел пластичности пород, %; W_e — естественная влажность пород, %.

При затоплении массива горных пород, вмещающего горные выработки, условия их поддержания, существенно изменяются. Негативным фактором является ослабление прочности пород околоствольного массива вследствие их обводнения. Данное ослабление учитывается коэффициентом

том k_{wo} , значения которого для различных пород приведены в таблице. При длительном контактировании пород горных выработок с водой (затопление массива, перепуск воды и т.п.) в расчетах применяется расчетное сопротивление пород под влиянием воды R_{cw} в МПа, которое следует определять по формуле (3) [3-16]:

$$R_{cw} = k_{wo} \cdot R_c, (3)$$

где k_{wo} — коэффициент, учитывающий изменение прочностных свойств пород под влиянием воды (Табл.) / (Table).

Значения глубин H между кривыми 1 и 2 определяются выражением (4):

$$a_2 \cdot R_{cw} > H > a_1 \cdot R_{cw}, (4)$$

Таблица / Table

Параметры ослабления обводненных пород Parameters of weakening of watered rocks

Тип пород / Type of rocks	k_{wo}
Песчаники и сланцы кремнистые	0,8
Песчаники известковые и известняки	0,7
Песчаники глинистые и алевролиты	0,6
Аргиллиты и мергели	0,5
Глины	0,4-0,5

В соответствии с выражением (4) устанавливается диапазон глубин H , при котором можно исключить необходимость проведения ремонта выработки при упрочнении пород. Этот диапазон будет неодинаковым для различных прочностных характеристик пород (5):

$$\Delta H = a_2 \cdot R_{cw} - a_1 \cdot R_{cw}, (5)$$

Из формулы (5) получаем показатель K_y , % (6), характеризующий необходимость снижения смещений пород в выработку в тех или иных условиях, который можно представить уравнением:

$$K_y = 100[1 - 10 \cdot R_{cw} / (H - 10 \cdot R_{cw})]. (6)$$

Выводы

Анализируя зависимость (6) можно сделать следующие выводы:

при $H \leq 20 R_{cw}$ нет необходимости в упрочнении пород ($K_y = 0$),

при $H = 30 R_{cw}$ коэффициент $K_y = 50\%$, ведение работ по упрочнению горных пород за пределами диапазона глубины $H > a_2 R_{cw}$ будет эффективным при возможности снижения смещений пород более чем на 50 %. В противном случае возникает необходимость в ремонте выработок.

Таким образом, на основе изложенного можно дать оценку условиям эффективности упрочнения пород для обеспечения устойчивости горных выработок и исключить случаи, когда упрочнение пород не эффективно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Хохлов БВ, Рожко МД, Дрибан ВА. К вопросу определения коэффициента, учитывающего изменение прочности пород обводненных массивов. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023;10(2):79-82. [Khokhlov BV, Rozhko MD, Driban VA. On the issue of changing the coefficient taking into account the change in the strength of rocks of watered massifs. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2023;10(2):79-82 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100212>.

2. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. Изд. 4-е, дополненное. Л., 1986. 222 с. [Instructions on the rational location, protection and maintenance of mine workings in the coal mines of the USSR. – Ed. 4th, supplemented. L., 1986. 222 p. (In Russ.)].
3. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Руководящий документ. РАНИМИ. Утв. Приказом Министерства угля и энергетики ДНР № 125 от 15.04.21. Донецк, 2021. 267 с. [Location, protection and maintenance of mine workings during mining of coal seams in mines. Guidance document. Approved by the Ministry coal and energy of the DPR 04/15.21. – Donetsk, 2021 (In Russ.)].
4. Дрибан ВА, Хохлов БВ, Рожко МД, Антипенко АВ. Изменение прочности пород обводненных массивов на примере участка "Ясиновский глубокий". *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов*. 23-27 октября 2023 г. М: ИПКОН РАН, 2023. С. 107-110. [Driban VA, Khokhlov BV, Rozhko MD, et al. Change in the strength of rocks of watered massifs on the example of the Yasinovsky Glubokiy site. *Problems of subsoil development in the XXI century through the eyes of the young*. Materials of the 16th International Scientific School of Young Scientists and Specialists. October 23-7, Moscow: IPCON RAS, 2023:107-10 (In Russ.)].
5. Терлецкий АМ, Рожко МД. Изменение упругих характеристик горных пород при затоплении горных выработок. *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов*. 28 октября-01 ноября 2019 г. М: ИПКОН РАН, 2019. С. 82-85. [Terletsky AM, Rozhko MD. Change in elastic characteristics of rocks during flooding of mine workings. *Problems of subsoil development in the XXI century through the eyes of the young*. Materials of the 14th International Scientific School of Young Scientists and Specialists. October 28-November 01, Moscow: IPCON RAS, 2019:82-5 (In Russ.)].
6. Ревва ВН. Прочностные и деформационные свойства упрочненных горных пород. *Физико-технические проблемы горного производства*. 2004;(7):158-166. [Revva VN. Strength and deformation properties of hardened rocks. *Physico-technical problems of mining production*. 2004;(7):158-66 (In Russ.)].
7. Alexeev AD, Revva VN, Molodetski AV. Stress state effect on the mechanical of coals under true triaxial Compression Conditions. *True Triaxial Testing of Rocks. Geomechanics Series*. 2011;(4):291.
8. Дрибан ВА, Петрушин АГ. Влияние обводненности массива горных пород на НДС при подземной разработке угольных пластов в пространственной постановке задачи. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр.* Донецк, 2022;18-19(33-34):39-81. [Driban VA, Petrushin AG. The influence of the waterlogging of the rock mass around the workings on VAT during underground mining of coal seams in the spatial formulation of the problem. *Proceedings of RANIMI: collection of scientific tr.* 2022;18-19(33-34):39-81 (In Russ.)].
9. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks principles and stress estimation techniques. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* 2003;40(2):151-71. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00138-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00138-7).
10. Бондаренко ЕС, Ефимов ВГ. Гидрогеологические проблемы закрытия угольных шахт. *Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник материалов XIV международной научной конференции аспирантов и студентов*. Посвящается Всемирному Дню окружающей среды, 75-летию Победы в Великой Отечественной Войне, Донецк, 14–16 апреля 2020 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. С. 82-84. [Bondarenko ES, Efimov VG. Hydrogeological problems of closing coal mines. *Environmental protection and rational use of natural resources*. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2020:82-4 (In Russ.)].
11. Laner D, Fellner J, Brunner P. Flooding of municipal solid waste landfills-an environmental hazard. *Science of The Total Environment*. 2009;407(12):3674–80. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.03.006>.
12. Hrad M, Huber-Humer M. Performance and completion assessment of an in-situ aerated municipal solid waste landfill – Final scientific documentation of an Austrian case study. *Waste Management*. 2017;63(1-2):397–409. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.043>.
13. Стулов ПА, Егоров АА, Гавриленко ТВ. Современные технологии создания модели порового пространства горных пород. *Вестник кибернетики*. 2019;1(33):47–54. [Stulov PA, Egorov AA, Gavrilenko TV. Modern technologies for creating a model of the pore space of rocks. *Bulletin of Cybernetics*. 2019;1(33):47-54 (In Russ.)].
14. Меренцов НА, Балашов ВА, Голованчиков АБ. [и др.] Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации: Часть 3: Уравнения для аппроксимации фильтрационной кривой. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021;27(3):401–414. [Merentsov NA, Balashov VA, Golovanchikov et al. The structure of the filtration curve and methods of its approximation. Part 3. Equations for approximating the filtration curve. *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2021;27(3):401-14 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2021.03.pp.401-414>.
15. Дрибан ВА, Дуброва НА. Трансформация геологической среды в угледобывающих регионах. *Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства: мат-лы VII науч.-техн. конф.* М.: ВНИПИпромтехнологии, 2022:102–112. [Driban VA, Dubrova NA. Transformation of the geological environment in coal-mining regions. *Environmental aspects of mining and processing production: materials of the VII scientific and technical Conf.* VNIPIpromtechnology, 2022:102-12 (In Russ.)].
16. Дрибан ВА, Петрушин АГ. Влияние обводненности массива горных пород вокруг выработок на НДС при подземной разработке угольных пластов в пространственной постановке задачи. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр.* Донецк, 2022;18–19(33–34):39–81. [Driban VA, Petrushin AG. The influence of the waterlogging of the rock mass around the workings on VAT during underground mining of coal seams in the spatial formulation of the problem. *Proceedings of RANIMI: collection of scientific tr.* Donetsk, 2022;18-19(33-34):39-81 (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Хохлов Борис Валентинович —
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, заведующий отделом горного
давления, Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Республиканский академический научно-
исследовательский и проектно-конструкторский
институт горной геологии, геомеханики,
геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк,
ДНР, РФ, e-mail: hbv@bk.ru

ABOUT THE AUTHOR

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

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПИ В ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТКАХ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Б. Б. Луганцев¹, А. И. Чавкин¹, Ю. В. Турук², Е. А. Гревцева², Н. Б. Афонина²

¹Общество с ограниченной ответственностью «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИИУИ»), г. Шахты, Российская Федерация

²Шахтинский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», г. Шахты, Российская Федерация

Аннотация: Приведены исследования работы двухуровневой анкерной крепи на шахтах российского Донбасса в выемочных выработках, сохраняемых для повторного использования. Установлено, что на больших глубинах (более 600 м) несмотря на существенное превышение (в 1,5–3,0 раза) требуемого в соответствии с «Инструкцией по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» сопротивления крепи усиления, паспорта с применением двухуровневой схемы анкерного крепления зачастую не обеспечивают допустимых смещений пород кровли.

Причины этого заключаются в некорректности распространения опыта применения двухуровневых анкерных схем крепления выемочных выработок на шахтах Кузбасса и основанных на нем алгоритмов расчета, содержащихся в указанной «Инструкции...», на шахты российского Донбасса.

На эффективность поддержания выемочных выработок на границе с выработанным пространством при двухуровневой схеме анкерного крепления оказывают существенное влияние прочность и монолитность пород кровли, в которых производится закрепление втулок канатных анкеров.

Для обеспечения эффективного применения двухуровневой анкерной крепи на больших глубинах необходимо выполнить научно-исследовательские работы по корректировке алгоритма определения параметров этой крепи для шахт российского Донбасса, а также добавить в «Инструкцию...» требования о закреплении втулок канатных анкеров на всю длину в прочных монолитных породах кровли и проведении ежедневных наблюдений за состоянием крепи и смещениями пород кровли выработок для обеспечения возможности своевременного принятия решений по усилению крепи.

Ключевые слова: двухуровневая анкерная крепь, инструкция по применению анкерной крепи, глубина ведения работ, смещения кровли, сопротивление крепи

Для цитирования: Применение двухуровневой анкерной крепи в выемочных выработках на больших глубинах / Б. Б. Луганцев, А. И. Чавкин, Ю. В. Турук [и др.]. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 89–94. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_89_94.

THE USE OF TWO-LEVEL ANCHORAGE IN EXCAVATION WORKINGS AT GREAT DEPTHS

B. B. Lugancev¹, A. I. Chavkin¹, J. V. Turuk², E. A. Grevtseva², N. B. Afonina²

¹Limited Liability Company «Shakhty Research and design and engineering Coal Institute» (LLC «Shakhtniui»),
Shakhty, Russian Federation

²Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov», Russian Federation

Abstract: The article presents studies of the operation of two-level anchorage in the mines of the Russian Donbass in excavation workings preserved for reuse. It was found that at great depths (more than 600 m), despite a significant excess (1.5–3.0 times) of the reinforcement resistance required in accordance with the «Instructions for calculating the use of anchorage in coal mines», passports using a two-level anchorage scheme often do not provide acceptable displacements of roof rocks.

The reasons for this are the incorrectness of spreading the experience of using two-level anchor schemes for fixing excavation workings in the Kuzbass mines and calculation algorithms based on it, contained in the specified Instruction, to the mines of the Russian Donbass.

To ensure the effective use of two-level anchorage at great depths, it is necessary to carry out research work on correcting the algorithm for determining the parameters of this support for the mines of the Russian Don Bass, as well as add to the Instructions the requirements

for fixing the bushings of rope anchors for the entire length in durable monolithic roof rocks and conducting daily observations of the condition of the support and displacements of the roof rocks of the workings to ensure the possibility of timely decision-makings on strengthening the support.

Keywords: Two-Level Roof Bolting, Instruction for the Use of Anchorage, Depth of Work, Displacement of the Roof, Resistance of the Support

For citation: Lugancev B. B., Chavkin A. I., Turuk J. V., et. al. The use of two-level anchorage in excavation workings at great depths. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):89-94. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_89_94.

Введение

На шахтах Российской Федерации и за рубежом применяется двухуровневая схема анкерного крепления выемочных выработок, сохраняемых для повторного использования на границе с выработанным пространством [1–5].

Использование двухуровневой анкерной крепи в ряде случаев позволяет отказаться от применения механизированной крепи сопряжения, снизить сопротивление стоечной крепи усиления и охранных конструкций вплоть до отказа от них [6–9], что нашло отражение в «Инструкции по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России» (далее по тексту – Инструкция) [10]. Но на шахтах Российского Донбасса она не получила широкого распространения.

Опыт использования двухуровневой схемы анкерного крепления выемочных выработок на шахтах российского Донбасса

На одной из шахт прошли испытания трех паспортов крепления выемочных штреков, сохраняемых для повторного использования на границе с выработанным пространством, с применением двухуровневой анкерной крепи.

К анкерной сталеполлимерной крепи, установленной при проведении выработки по шесть анкеров в ряд с шагом 0,9 м, в зоне влияния очистных работ добавлялись:

– в паспорте 1 – три канатных анкера типа АК01-25 длиной 6,0 м, устанавливаемых с шагом 1,8 м, и два ряда металлических стоек трения из СВП27 с замками ЗПК, устанавливаемых с шагом 0,90 м;

– в паспорте 2 – четыре канатных анкера типа АКШН длиной 6,0 м, устанавливаемых с шагом 1,8 м, два ряда металлических стоек из СВП27 с замками ЗПК, устанавливаемых с шагом 0,90 м и один ряд с шагом 1,8 м;

– в паспорте 3 – четыре канатных анкера АКШН длиной 6,0 м с повышенной плотностью установки (с шагом 0,9 м) и три ряда металлических стоек из СВП27 с замками ЗПК, устанавливаемых с шагом 0,90 м.

Испытания проводились в штреке, пройденном по пласту k_2 со смешанной подрывкой, на глубине 630 м. Мощность пласта составляла 0,95–1,53 м, угол падения – 12–16°.

Непосредственная кровля пласта представлена песчано-глинистыми и песчаными сланцами с прочностью на сжатие 50–70 МПа и общей мощностью от 4,4 до 21,8 м. В основной кровле залегает песчаник мощностью от 1,8 до 3,5 м и прочностью на одноосное сжатие 100–120 МПа.

Опытные участки, закрепленные в соответствии с описанными паспортами, располагались рядом друг с другом в похожих горно-геологических условиях. Результаты испытаний приведены в таблице.

Основным критерием эффективности применения паспорта крепления выемочного штрека являются смещения пород кровли по центру выработки. Согласно Инструкции, смещения пород кровли в выработках, подверженных влиянию очистных работ, за весь срок их эксплуатации не должны превышать 300 мм.

Таблица / Table

Результаты испытаний паспортов крепления выемочных штреков / Test results of the mounting passports of the dredging drifts

Паспорт / Passport	Фактическое сопротивление крепи усиления, кН/м / The Actual resistance of the strengthening the support, kN/m			Необходимое сопротивление стоек крепи усиления по Инструкции, кН/м / The required resistance of the reinforcement struts according to the Instruction, kN/m	Смещения пород кровли, мм / Displacement of roof rocks, mm
	канатной анкерной / cable anchor	металлической стоечной / metal drop	суммарное / total		
1	350	556	906	580	552
2	458	694	1 152	580	345
3	916	833	1 749	580	287

На рисунке приведены графики смещений пород кровли на участках испытания вышеуказанных паспортов крепления.

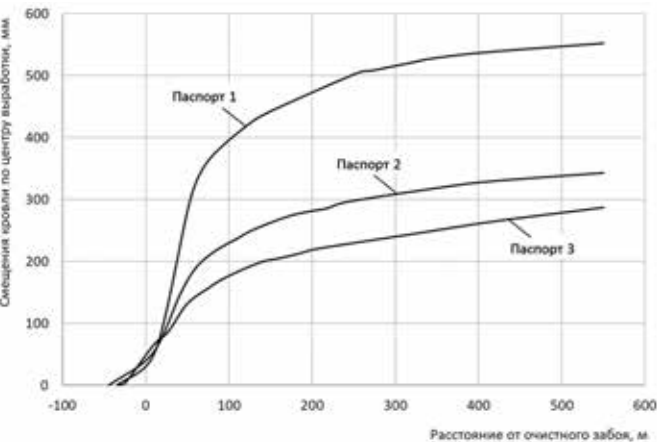


Рис. Графики смещений пород кровли на участках испытания паспортов крепления выемочных штреков с применением двухуровневой схемы анкерного крепления

Fig. Graphs of displacements of roof rocks at the test sites for mounting passports of dredging drifts using a two-level anchorage scheme

Только при применении третьего паспорта крепления смещения пород кровли за линией первого очистного забоя не превысили 300 мм (287 мм). Но за весь срок эксплуатации выработки суммарные смещения пород кровли при применении этого паспорта превысят 300 мм.

По результатам испытаний шахта отказалась применять двухуровневую анкерную крепь для сохранения выемочных выработок, поддерживаемых для повторного использования на границе с выработанным пространством.

Пункт 37 Приложения 1 Инструкции в случае приме-

нения двухуровневой анкерной крепи не предусматривает установки стоек усиления в зонах опорного давления первой и второй лав. В описываемых испытаниях помимо двухуровневой анкерной крепи во всех паспортах использовались металлические составные стойки. Сопротивление стоек крепи усиления было сопоставимо или даже превышало сопротивление крепи усиления, требуемое при одноуровневой анкерной крепи.

Тем не менее, несмотря на существенное (в 1,5–3,0 раза) превышение требуемого в соответствии с Инструкцией сопротивления крепи усиления, испытанные паспорта с применением двухуровневой схемы анкерного крепления не обеспечили допустимых смещений пород кровли.

Причины этого заключаются в некорректности распространения опыта применения двухуровневых анкерных схем крепления выемочных выработок на шахтах Кузбасса и основанных на нем алгоритмов расчета, содержащихся в Инструкции, на шахты российского Донбасса. В связи с этим необходимо выполнить научно-исследовательские работы по корректировке алгоритма определения параметров двухуровневой анкерной крепи для шахт российского Донбасса.

В процессе исследований было установлено, что на эффективность поддержания выемочных выработок на границе с выработанным пространством при двухуровневой схеме анкерного крепления оказывают существенное влияние прочность и монолитность пород кровли, в которых производилось закрепление втулок канатных анкеров. К таким же выводам пришли и другие исследователи [11–19].

На участках испытаний с повышенными смещениями пород кровли втулки анкеров закреплялись в слоистых сланцевых породах. На участке испытаний с наименьшими смещениями пород кровли втулки анкеров закреплялись на длине 0,5–1,1 м в песчанке основной кровли.

При определении необходимой длины канатных анкеров в действующей Инструкции длина закрепления анкера выше свода естественного равновесия принимается равной 0,8–1,0 м. Между тем минимальная длина закрепляющих втулок современных канатных анкеров составляет не менее 1,1 м для анкеров с расчетной несущей способностью 210 и 250 кН и не менее 1,5 м для анкеров с расчетной несущей способностью 320 кН.

При таком несоответствии занижается расчетная длина анкера, что может являться одной из причин их неэффективной работы.

Для конвейерного штрека одной из шахт российского Донбасса, расположенного на глубине 770–780 м, уточнение горно-геологических условий было выполнено специалистами из Кузбасса по одной скважине диаметром 60 мм и длиной 5,35 м. На основании полученных данных были выполнены расчеты по Инструкции и разработаны рекомендации по креплению и охране штрека с установкой канатных анкеров длиной 6 м, а за линией очистного забоя и деревянных стоек диаметром 25 см.

При расчете анкерной крепи мощность непосредственной кровли выработки, представленной песчано-глинистыми и глинистыми сланцами, была принята равной 4,63 м. Выше залегал прочный и монолитный песчаник основной кровли, в котором закреплялись втулки канатных анкеров длиной 6,0 м (длина втулок – 1,1 м). Расчетное значение высоты свода естественного равновесия составило 4,64 м,

то есть практически совпало с мощностью пород непосредственной кровли.

На участке первичной отработки лавы длиной 200 м от монтажной камеры мощность непосредственной кровли оказалась намного больше расчетной и превышала длину канатных анкеров. Смещения пород кровли на этом участке превысили допустимые значения в среднем в два раза и имели максимальное значение в 1 160 мм [20]. Выработка на этом участке оказалась непригодной не только для эксплуатации, но и для перекрепления, что нанесло значительный экономический ущерб шахте.

При дальнейшем подвигании лавы мощность пород непосредственной кровли снизилась до расчетных значений, и двухуровневая анкерная крепь с рекомендованными параметрами работала успешно.

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что одним из условий применения канатных анкеров в выемочных выработках на больших глубинах ведения горных работ является закрепление втулок на всю длину в прочных и монолитных породах кровли.

Помимо этого, существует проблема определения достоверных значений высоты свода естественного равновесия. Эмпирическая формула ее определения учитывает: прочность пород, наличие плоскостей ослабления в породах кровли, обводненность пород, влияние очистных работ, ширину выработки, но не учитывает глубину ведения горных работ.

При отклонениях значений горно-геологических факторов от принятых для расчета высота свода естественного равновесия может существенно изменяться, что не учитывается при принятии для расчета анкерной крепи некоторого «усредненного» значения горно-геологических факторов для выработки или ее участка значительной длины. Это обстоятельство становится причиной недостаточности длины канатных анкеров на отдельных участках выработок.

Пункт 19 Инструкции при отсутствии геологических данных о свойствах вмещающих пород предусматривает разработку документации крепления на основе данных, полученных при бурении разведочных скважин в кровлю горной выработки и отбора керна для определения типа ее кровли, прочности, мощности, слоистости и трещиноватости пород. Это достаточно непростая задача, требующая наличия специального оборудования и квалифицированного персонала. На практике такие задачи решаются, как правило, работниками специализированных научно-технических организаций.

Но даже это не обеспечит достоверного определения горно-геологических условий по всей длине выемочной выработки, особенно в части наличия и количества слабых контактов в кровле выработки, расстояния от контура кровли выработки до прочных пород кровли, которые могут использоваться для надежного закрепления втулок канатных анкеров. Это обусловлено тем, что изменения горно-геологических факторов зачастую носят довольно резкий характер и могут иметь место на незначительных по длине участках выработок.

Горно-геологические условия по длине выемочных выработок изменяются и порой в довольно широких пределах. Для достоверного определения горно-геологических условий по трассе выемочной выработки потребуются бурение немалого количества разведочных скважин.

**Рекомендации по обеспечению
безопасности применения
двухуровневых схем анкерного крепления
выемочных выработок**

При поддержании выемочных выработок в зоне влияния очистных работ необходимо производить ежедневные наблюдения за состоянием анкерной крепи и смещениями пород кровли с целью своевременного выявления недопустимых деформаций анкерной крепи и повышенных смещений пород кровли.

В паспорте выемочного участка должны быть предусмотрены варианты крепления выработки для зон с различным составом пород кровли.

Критерии недопустимых деформаций анкерной крепи и повышенных смещений пород кровли для каждого шахтопласта должны быть получены в результате научно-исследовательских работ.

Применение в выемочных выработках двухуровневой анкерной крепи на больших глубинах (более 600 м) возможно

только при закреплении втулок канатных анкеров на всю длину в прочных и монолитных породах.

Заключение

Для поддержания выемочных выработок на больших глубинах (более 600 м) с использованием двухуровневой анкерной крепи необходимо:

– выполнить научно-исследовательские работы по корректировке алгоритма определения параметров крепи для шахт российского Донбасса;

– заменить в формуле Инструкции для определения длины канатных анкеров длину закрепления, равную $0,8 \div 1,0$ м, на длину втулки канатного анкера;

– добавить в Инструкцию требования:

1) закреплять втулки канатных анкеров на всю длину в прочных монолитных породах кровли;

2) производить ежедневные наблюдения за состоянием крепи и смещениями пород кровли выработок для обеспечения возможности своевременного принятия решений по усилению крепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Зейнуллин АА, Абеуов ЕА, Демин ВФ. [и др.] Оценка способов поддержания горных выработок на основе применения анкерной крепи на шахтах Карагандинского угольного бассейна. *Уголь*. 2021;(2):4–9. [Zeynullin AA, Abeuov EA, Demin VF, et al. Estimation of ways to maintain mining works based on the application of anchor anchoring in the mines of the Karaganda coal basin. *Coal*. 2021;(2):4–9 (In Russ.)]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-4-9.
2. Гречишкин ПВ, Разумов ЕА, Заятдинов ДФ, Чугайнов СС. Современные технологии двухуровневого анкерного крепления: перспективы применения при отработке рудных месторождений полезных ископаемых в различных горногеологических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016;(10):182–200. [Grechishkin PV, Razumov EA, Zayatdinov DF, et al. Modern Technologies of Two-Level Anchoring: Prospects of Application to Ore Deposit Mining in Different Mining and Geological Conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(10):182–200 (In Russ.)].
3. Разумов ЕА, Заятдинов ДФ, Гречишкин ПВ, Позолотин АС, Грабовский ВА. Опыт поддержания широких сопряжений горных выработок с применением двухуровневой анкерной крепи в условиях шахты МУК-96. *Уголь*. 2013;(7):31–34. [Razumov EA, Zayatdinov DF, Grechishkin PV, et al. Experience of Supporting Wide Mining Junctions Using Two-Level Roof Bolting in the Conditions of MUK-96 Mine. *Coal*. 2013;(7):31–4 (In Russ.)].
4. Разумов ЕА, Гречишкин ПВ, Самок АВ, Позолотин АС. Опыт применения канатных анкеров для сохранения и повторного использования штреков угольных шахт. *Уголь*. 2012;(6):26. [Razumov EA, Grechishkin PV, Samok AV, et al. Experience of Using Rope Anchors to Maintain and Reuse Coal Mine Drifts. *Coal*. 2012;(6):26–7 (In Russ.)].
5. Qian Kun, Xin Xiao-dong, Che Yu-long. The Design and Application of Rock Bolting in Coal Mine. *Energy Procedia*. 2012;14:280–4. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.930.
6. Самок АВ, Райко ГВ, Позолотин АС, Гречишкин ПВ. Канатный анкер АК01: усиление крепи штреков для работы очистного забоя без механизированной крепи сопряжения. *Уголь*. 2011;(10):9–11. [Samok AV, Raiko GV, Pozolotin AS, et al. Rope anchor AK01: strengthening system for work of a lava without mechanized system interface. *Coal*. 2011;10:9–11 (In Russ.)].
7. Еременко ВА, Разумов ЕА, Заятдинов ДФ. [и др.] Совершенствование двухуровневой технологии анкерного крепления широких сопряжений горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013;(5):20–29. [Eremenko VA, Razumov EA, Zayatdinov DF, et al. Improving the Two-Tier Technology Anchorage Broad Mate of Mine Workings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013;(5):20–30 (In Russ.)].
8. Гречишкин ПВ, Позолотин АС, Заятдинов ДФ, Шаров ВН. Оценка эффективности двухуровневого анкерного крепления сопряжений горных выработок угольных шахт. *Горный журнал*. 2015;(8):48–52. [Grechishkin PV, Pozolotin AS, Zayatdinov DF, et al. Evaluation of the Effectiveness of Two-Level Anchor Fastening of Coal Mine Workings. *Mining Journal*. 2015;(8):48–51 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.11.
9. Привалов АА. Обоснование параметров двухуровневой анкерной крепи для поддержания повторно используемых выработок в условиях шахт Восточного Донбасса: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2011. 141 с. [Privalov AA. Substantiation of the Parameters of a Two-Level Anchor Support for Maintaining Reusable Workings in the Conditions of the Mines of the Eastern Donbass: Dis. ... candidate of technical Sciences. Novocherkassk, 2011 (In Russ.)].

10. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по расчёту и применению анкерной крепи на угольных шахтах». Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ от 19 ноября 2020 года № 448 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264130> (дата обращения: 26.09.2024). [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Instructions for the calculation and use of anchor support in coal mines". Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, Order No. 448 dated November 19, 2020. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/573264130> (In Russ.)].
11. Казанин ОИ, Сидоренко АА, Евсюкова АА, Лю Ц. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023;(9-1):5–21. [Kazanin OI, Sidorenko AA, Evsiukova AA, et al. Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):5-21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5 (In Russ.)].
12. Демин ВФ, Демина ТВ, Стефлюк ЮЮ. [и др.] Оценка влияния горно-технологических факторов и схемы работы анкера на эффективность применения анкерного крепления в выемочных выработках. *Труды университета*. 2014;1(54):43–46. [Karataev AD, Demin VF, Stezyuk YuYu. Assessment of the Influence of Mining and Technological Factors and Anchor Operation Scheme on the Effectiveness of the Use of Anchor Fastening in Excavation Workings. *Proceedings of the KarSTU*. 2014;1(54):43-6 (In Russ.)].
13. Мартыненко ИИ, Солуянов НО, Крапивин ВА. О взаимодействии пород кровли конвейерного штрека с анкерной крепью, установленной по двухуровневой схеме. *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. Спец. выпуск. Совершенствование техники и технологии угодобычи*. 2006:74–76. [Martynenko II, Soluyanov NO, Krapivin VA. About Interaction of Roof Rocks of a Conveyor Drift with Anchor Support Installed on the Double-Level System. *Higher School Proceedings. North-Cauc. Region. Technical Sciences. Special Issue. Perfecting Coal Mining Equipment and Technology*. 2006:74-6 (In Russ.)].
14. Peng Wang, Nong Zhang, Qun Wei, et al. Mechanical responses of anchoring structure under triaxial cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(2):545-60. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.04.020.
15. Feng Guo, Nong Zhang, Xiaowei Feng, et al. Variations of entries and bolting technologies, a case study based on a field monitoring of a longwall face. *Engineering Geology*. 2024;331:107458. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107458.
16. Yanpei An, Nong Zhang, Yiming Zhao, et al. Field and numerical investigation on roof failure and fracture control of thick coal seam roadway. *Engineering Failure Analysis*. 2021;128:2105594. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105594.
17. Syd Peng. Roof bolting and underground roof falls. *Geohazard Mechanics*. 2023; 1(1):32-7. DOI: 10.1016/j.ghm.2022.11.005.
18. Wei Wang, Yishan Pan, Yonghui Xiao, et al. Optimizing support performances of bolt reaming and anchoring in a coal drift. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.030.
19. Zhang Jinpeng, Liu Limin, Liu Chuanxiao, et al. Mechanism and application of new prestressed yield bolt for controlling deep high-stress rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022;119:104254. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104254.
20. Луганцев ББ, Беликова НВ, Беликов ВВ, Чавкин АИ. Поддержание выработки для повторного использования в аномальной зоне повышенного горного давления. *Уголь*. 2021;(4):10–14. [Lugantsev BB, Belikova NV, Belikov VV, et al. Upkeep of the drift for reuse in an abnormal zone of high mining pressure. *Coal*. 2021;(4):10-4. (In Russ.)]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-10-14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Борисович Луганцев –

профессор, доктор технических наук, председатель совета директоров, Общество с ограниченной ответственностью «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИУИ»), г. Шахты, Российская Федерация

Александр Иванович Чавкин –

кандидат технических наук, заведующий лабораторией. Общество с ограниченной ответственностью «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИУИ»), г. Шахты, Российская Федерация, e-mail: Shahtniui.tgr@mail.ru

Юрий Владимирович Турук –

доктор технических наук, профессор. Шахтинский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», г. Шахты, Российская Федерация

Елена Анатольевна Гревцева –

доцент, канд. экон. наук, Шахтинский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Шахты, Российская Федерация

Наталья Борисовна Афонина –

доцент, канд. техн. наук, Шахтинский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», г. Шахты, Российская Федерация

Критерии авторства / Contribution:

Б. Б. Луганцев – существенный вклад в научно-исследовательскую работу, окончательное утверждение для публикации. А. И. Чавкин – существенный вклад в научно-исследовательскую работу, доработка и исправление рукописи. В. Д. Турук – существенный вклад в научно-исследовательскую работу, ответственность за целостность всех частей рукописи. Е. А. Гревцева – существенный вклад в научно-исследовательскую работу, доработка рукописи. Н. Б. Афонина – существенный вклад в научно-исследовательскую работу, исправление рукописи. / B. B. Lugantsev – significant contribution to research work, final approval for publication. A. I. Chavkin – significant contribution to research work, revision and correction of the manuscript. V. D. Turuk – significant contribution to research work, responsibility for the integrity of all parts of the manuscript. E. A. Grevtseva – significant contribution to scientific research, revision of the manuscript. N. B. Afonina – a significant contribution to scientific research, correction of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

ABOUT THE AUTHORS

Boris B. Lugancev –

Professor, Doctor of Engineering Sciences, Chairman of the Board of directors. Limited Liability Company «Shakhty Research and design and engineering Coal Institute» (LLC «Shakhtniui»), Shakhty, Russian Federation

Alexander I. Chavkin –

Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory. Limited Liability Company «Shakhty Research and design and engineering Coal Institute» (LLC «Shakhtniui»), Shakhty, Russian Federation, e-mail: Shahtniui.tgr@mail.ru

Jurij V. Turuk –

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platon», Shakhty, Russian Federation

Elena A. Grevtseva –

Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platon», Shakhty, Russian Federation

Natalia B. Afonina –

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platon», Shakhty, Russian Federation

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Д. С. Лепетюха^{1,2}, С. Д. Яцыняк^{1,2}, И. В. Синица¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт ОАО «ВТОГЕМ», г. Белгород, Россия

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия

Аннотация: Представлены результаты длительного мониторинга деформационных процессов массива основных типов горных пород в исследуемых горно-капитальных выработках Гремячинского месторождения. Мониторинг деформационных процессов массива выполнялся с помощью цифрового ленточного экстензометра на установленных реперных станциях. Предложенная методика мониторинга позволила определить фактические величины смещений, по результатам которых была установлена связь величин смещений во времени на различных участках наблюдений. Полученные результаты используются для оценки устойчивого состояния массива горных пород в процессе длительной эксплуатации горно-капитальных выработок, а также могут послужить основой при проектировании горных выработок в подобных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: мониторинг деформационных процессов, горно-капитальные выработки, конвергенция, ленточная экстензометрия, реперные станции

Для цитирования: Лепетюха Д. С., Яцыняк С. Д., Синица И. В. Мониторинг деформационных процессов горных пород в условиях Гремячинского месторождения калийных солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 95-99. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_95_99.

MONITORING DEFORMATION PROCESSES OF ROCKS IN THE GREMYACHINSKOE POTASSIUM SALTS DEPOSIT

D. S. Lepetyukha^{1,2}, S. D. Yatsynyak^{1,2}, I. V. Sinitsa¹

¹All-Russian Research Institute, OJSC «VTOGEM», Belgorod, Russian Federation

²Belgorod State National Research University NRU «BelSU», Belgorod, Russian Federation

Abstract: This paper presents the results of long-term monitoring of the deformation processes of the massif of the main types of rocks in the studied mining and capital workings of the Gremyachinsky deposit. Displacement monitoring was performed using a digital tape extensometer at installed reference stations. The proposed monitoring technique makes it possible to determine the actual values of the displacements, according to the results of which the relationship between the values of the displacements in time at different observation sites is established. The results obtained are used to assess the stable state of the rock mass during the long-term operation of mining and capital workings, and can also serve as a basis for the design of mining workings in similar mining and geological conditions.

Keywords: monitoring of deformation processes, permanent workings, convergence, tape extensometry, reference stations

For citation: Lepetyukha D. S., Yatsynyak S. D., Sinitsa I. V. Monitoring deformation processes of rocks in the Gremyachinskoe potassium salts deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):95-99. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_95_99.

Введение

В зависимости от физико-механических характеристик массива горных пород процессы деформирования и разрушения в стенках, кровле и почве выработки классифицируются как различные типы проявления горного давления. В упругопластичных и пластичных породах при определенных уровнях деформирования во времени структура массива теряет прочностные характеристики, что приводит к внешним признакам проявления данных процессов: возникновению отслоений и отжима в кровле и боках выработки, пучению почвы. Эти факторы в свою очередь приводят к нарушению целостности сопряжений, изменению площади

поперечного сечения и постепенному разрушению горных выработок.

В зависимости от сложности горно-геологических условий на объекте исследования мониторинг может быть только визуальным или осуществляться в сочетании с использованием специального измерительного оборудования. Наблюдения производят с периодической или постоянной регистрацией измерений.

Особенно актуальной данная проблема является при ведении горных работ в породных массивах, расположенных на больших глубинах и обладающих упругопластичными и пластичными свойствами. В подобных ситуациях возникает

необходимость организации инструментальных наблюдений за процессом деформирования массива горных пород в подземных горных выработках, результаты которых своевременно обеспечивают безопасное ведение горных работ. В связи с этим важной задачей службы мониторинга каждой соляной шахты является контроль деформационных процессов массива горных пород во времени.

В зарубежной практике для контроля деформационных процессов массива горных пород и крепи подземных горных выработок на рудниках и шахтах применяют различные специальные инструментальные средства измерений: анкеры, акустические экстензометры, контрольные экстензометры, волоконно-оптические датчики, волоконные брэгговские решетки, различные датчики деформаций и напряжений и др. [1–5].

Широкое применение в практической геомеханике получил метод ленточной экстензометрии, с помощью которого можно контролировать оползневые процессы на открытых горных работах, а также сближения стенок (конвергенцию) горных выработок, применяя различные схемы измерения в подземных условиях [6, 7].

В российской литературе описаны методы изучения деформационных процессов, которые зачастую производились с помощью геодезического оборудования или специальных геомеханических средств измерений [8, 9]. Известен опыт применения ленточного экстензометра при проведении экспериментальных исследований деформирования массива горных пород с помощью глубинных реперов [10].

Институтом ОАО «ВИОГЕМ» мониторинг смещений горизонтальных и наклонных горно-капитальных выработок (ГКВ) на Гремячинском месторождении производится с 2013 года.

Выбор данной методики обусловлен комплексным подходом к выполнению натурных наблюдений.

Работы проводились в два этапа:

- на первом этапе осуществлялось измерение фактических напряжений в забое методом частичной разгрузки на больших базах [11] с применением усовершенствованных измерительных головок [12];
- на втором этапе использовались установленные репера для мониторинга конвергенции горных выработок.

Метод измерения смещений ленточным экстензометром обоснован тем, что определения планово-высотного положения наблюдаемых реперов не позволяют произвести точную привязку к опорным пунктам маркшейдерской сети при измерениях высокоточным геодезическим оборудованием из-за нахождения опорных реперов в породах, обладающих реологическими свойствами.

Цель исследований

Определение фактических смещений породного массива для дальнейшей оценки устойчивости и безопасного эксплуатационного состояния горно-капитальных выработок.

Идея исследований: определение деформаций массива горных пород во времени, установление характера деформирования массива после проходки выработок в породах – ангидрит-доломитовых, каменной соли, сильвинита и карналлита.

Практическое и научное значение исследований обусловлено получением достоверных данных мониторинга при длительном наблюдении и новых зависимостей деформационного процесса для данного месторождения.

Материал и методы исследования

Реперные станции (РС) устанавливались в процессе проходки горно-капитальных выработок на глубинах 1100–1300 м во всех типах пород, характерных для Гремячинского месторождения: ангидрит-доломитовых, ангидрит-доломитовых с прослоем каменной соли, галитовых, карналлитовых и сильвинитовых (породы).

Расположение РС осуществлялось по всему шахтному полю на наиболее характерных участках исследования: в околоствольном дворе, на западном, северо-западном и восточном направлениях. Измерения выполнялись на реперных базах по принятым схемам расположения реперов: в кровле, почве и стенках выработки (рис. 1а), в кровле и стенках выработки (рис. 1б). Схема измерений с дополнительным репером в почве применялась преимущественно в сопряжениях соляных пород с большим сечением. Следует отметить, что предложенное расположение реперов в выработке является наиболее благоприятным с точки зрения пространственного расположения и получения конечных результатов.

Заложение реперов осуществлялось на глубину 1,3 м, что обеспечило длительную сохранность тела репера в процессе деформирования массива. Также в конструктивных особенностях репера был учтен фактор повреждения измерительного кольца, который устранялся взаимозаменяемым элементом. Измерения смещений массива горных пород на данном месторождении производились ленточным экстензометром ИТМ-Soil, оборудованным стальной измерительной лентой и цифровым датчиком линейных перемещений. Высокая точность при измерениях длин линий между двумя реперами достигается за счет введения поправки на температуру, минимальной погрешности измерений электронного микрометра ($\pm 0,01$ мм), точности снятия показаний (от $\pm 0,01$ до $\pm 0,1$ мм) [13].

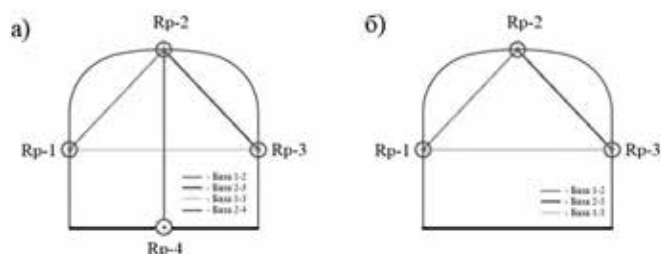


Рис. 1. Типовая схема расположения реперов в горно-капитальных выработках:

а) в кровле, почве и стенках выработки; б) в кровле и стенках

Fig. 1. Typical layout of benchmarks in capital mine working: а) in the roof, soil and walls of the workings; б) in the roof and walls

Результаты экспериментальных исследований

По данным натурных наблюдений за процессом деформирования горно-капитальных выработок определены суммарные смещения на реперных станциях и выявлены характерные зависимости смещений приконтурного массива во времени. Данные о смещениях, полученные с помощью ленточного экстензометра, позволяют напрямую оценить устойчивость горных выработок. Итоговой информацией служат графики зависимостей смещения породного массива от времени наблюдений на каждом участке исследования. В зависимости от времени эксплуатации выработок возможно устанавливать категорию устойчивости пород для корректировки проектных решений в части крепления и перекрепления горных выработок.

Оценку категории устойчивости пород в исследуемых выработках предложено выполнять по величине смещений породного массива за весь период наблюдений [14]. Таким образом, выбор способов охраны и крепления горных выработок на Гремячинском месторождении принято производить с учетом указания категории устойчивости пород и характеристик структурного строения массива в кровле, почве и стенках выработок [15].

На рисунке 2 представлен обобщенный график зависимостей смещений приконтурного массива во времени для основных типов горных пород Гремячинского месторождения. При построении зависимостей использовались усредненные значения по реперным станциям (максимальные смещения репера в кровле и стенках выработки).

Изменение смещений массива горных пород U во времени t аппроксимируются логарифмическими зависимостями с достаточной достоверностью аппроксимации (R^2):

$$\begin{aligned} U_{\text{(карналлит)}} &= 69 \ln(t) - 264; (R^2 = 0,93), \\ U_{\text{(сильвинит)}} &= 23,15 \ln(t) - 82; (R^2 = 0,95), \\ U_{\text{(каменная соль)}} &= 5,14 \ln(t) - 9,5; (R^2 = 0,97), \\ U_{\text{(анг.-дол. с просл.)}} &= 4,93 \ln(t) - 10,8; (R^2 = 0,95). \end{aligned}$$

Полученные зависимости могут применяться для дальнейшей оценки безопасной эксплуатации и прогноза устойчивого состояния подземных горных выработок исследуемого месторождения.

Фактические данные натурных наблюдений могут послужить хорошей основой для верификации моделей при моделировании.

Заключение

Важной задачей при проведении мониторинга является определение устойчивости горных выработок при наблюдениях за проявлением горного давления. В зарубежной и российской практике измерения при долговременном мониторинге смещений с использованием ленточного экстензометра не проводились. Впервые этот опыт был применен в горно-капитальных выработках Гремячинского месторождения.

Наиболее важным элементом данного исследования является анализ результатов измерений, который проводится для определения параметров процесса деформирования массива горных пород на участках исследования. Актуальность настоящих исследований представляет научный интерес, который подтверждается непрерывным изучением различных причин процесса деформирования массива горных пород многими исследователями и научными организациями [10–11, 15–20].

На основании измерений смещений реперов ленточным экстензометром установлены зависимости деформационных процессов массива горных пород во времени для данного месторождения. Данные натурных наблюдений позволили напрямую оценить категорию устойчивости горных выработок на различных участках исследования.

Выводы

1. В статье представлена экспериментальная методика мониторинга деформационных процессов массива пород в сложных горно-геологических условиях. Рассмотрена общая концепция формирования и расположение реперных станций в подземных горно-капитальных выработках Гремячинского месторождения.
2. Определены фактические значения смещений породного массива на различных участках наблюдения. Установлены зависимости смещений во времени для основных типов пород Гремячинского месторождения.
3. С учетом полученных результатов натурных наблюдений возможно осуществление корректировок проектных решений по перекреплению подземных горных выработок в процессе эксплуатации.
4. Результаты мониторинга служат основой для комплексной оценки эксплуатационного состояния горных выработок с дальнейшим присвоением категории устойчивости массива.
5. В дальнейших работах на основе анализа данных натурных наблюдений будут представлены характеристики процесса деформирования массива для основных типов горных пород Гремячинского месторождения.

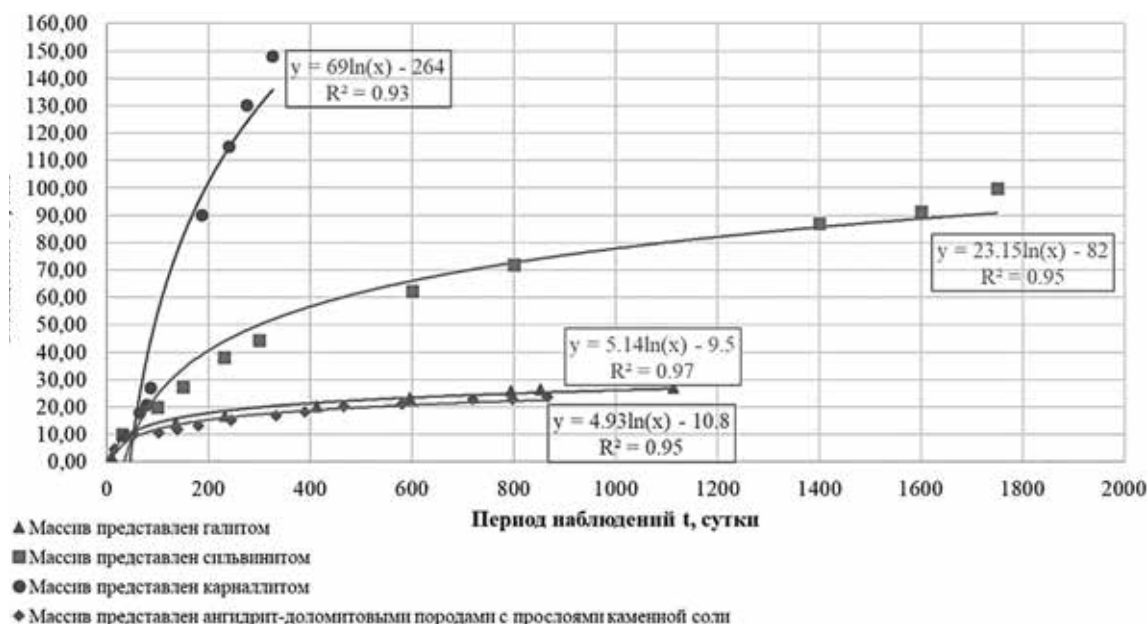


Рис. 2. Зависимости смещений приконтурного массива горно-капитальных выработок от времени в основных типах пород Гремячинского месторождения по результатам длительного мониторинга

Fig. 2. Dependences of displacements of the peripheral mass of capital underground mining on the main types of rocks of the Gremyachenskoe deposit according to the results of long-term monitoring

1. Heritage Y. Mechanics of rib deformation – Observations and monitoring in Australian coal mines. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2019;29(1):119-29. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.017.
2. Gong H, Kizil MS, Chen Z, et al. Advances in fiber optic based geotechnical monitoring systems for underground excavations. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2019;29(2):229-38. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.007.
3. Zhao Y, Zhang N, Si G. A Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Roof Safety Control in Underground Coal Mining. *Sensors.* 2016;16:1759. DOI: 10.3390/s16101759.
4. Hu T, Hou G, Li Z. The Field Monitoring Experiment of the Roof Strata Movement in Coal Mining Based on DFOS. *Sensors.* 2020;20(5):1318. DOI: 10.3390/s20051318.
5. Skrzypkowski K. Case Studies of Rock Bolt Support Loads and Rock Mass Monitoring for the Room and Pillar Method in the Legnica-Głogów Copper District in Po-land. *Energies.* 2020;13(11):2998. DOI: 10.3390/en13112998.
6. Matuszkova B, Qu J, Neuman D. Using of the Tape Extensometer for Possibilities of Landslide Monitoring or other purposes. *7th World Multidisciplinary Earth Sciences Sym-posium (WMESS 2021). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2021;906(1):01026. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012026.
7. Szczerbowski Z, Niedbalski Z. The Application of a Sonic Probe Extensometer for the Detection of Rock Salt Flow Field in Underground Convergence Monitoring. *Sensors.* 2021;21(6):5562. DOI: 10.3390/S21165562.
8. Прушак ВЯ. Деформация контура горных выработок Старобинского месторождения калийных солей при различных глубинах заложения. *Доклады Национальной академии наук Беларуси.* 2016;60(2):97–101. [Prushak VYa. Deformation of the contour of mine workings of the Starobinsky deposit of potassium salts at different depths. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus.* 2016;60(2):97-101 (In Russ.)].
9. Стаднюк ЕД. Шахтные инструментальные наблюдения конвергенции вмещающих пород в действующих очистных забоях. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле.* 2013;(3):126–135. [Stadnyuk ED. Mine instrumental observations of the convergence of host rocks in active working faces. *Izvestia of Tula State University. Geosciences.* 2013;3:126-35 (In Russ.)].
10. Токсаров ВН, Морозов ИА, Бельтюков НЛ, Ударцев АА. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2020;(7):113–124. [Toksarov VN, Morozov IA, Beltyukov NL, et al. Study of deformation of underground mine workings in the conditions of the Gremyachinskoye potassium salt deposit. *Mining information and analytical bulletin.* 2020;(7):113-24. DOI:10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124 (In Russ.)].
11. Лепетьуха ДС, Храмов БА. Напряженное состояние массива горных пород Гремячинского месторождения. *Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки: Мат-лы XXX Межд. науч.-практ. конф., Bengaluru, India, 12–13 декабря 2022 года. Bengaluru, Karnataka: Pothi.com, 2022. С. 63–67. [Lepetyukha DS, Khramtsov BA. Stressed state of the rock mass of the Gremyachinskoye deposit. *Materials of the XXX international scientific and practical conference "Fundamental science and technology – advanced developments".* 2022:63-7 (In Russ.)].*
12. Патент № 2761081 С1 Российская Федерация, МПК E21C 39/00. Устройство для измерения деформаций на стенках горной выработки: № 2021114174; заявл. 19.05.2021; опубл. 03.12.2021. С. Д. Яцыняк, И. В. Синица, С. В. Сергеев [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет». [Patent No. 2761081 С1 Russian Federation, IPC E21C 39/00. Device for measuring deformations on the walls of a mine opening: No. 2021114174: application. 05/19/2021: publ. 12/03/2021 / S. D. Yatsinyak, I. V. Sinitsa, S. V. Sergeev [and others]; applicant: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Belgorod State National Research University" (In Russ.)].
13. Руководство по эксплуатации. Ленточный экстензометр ITM-Soil. М., 2013. 13 с. [Operation manual. ITM-Soil tape extensometer. Moscow, 2013 (In Russ.)].
14. СП 91.13330.2012. Свод правил. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80" (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 № 283) (ред. от 17.12.2021) [Электронный ресурс]. URL: docs.cntd.ru/document/1200095532 (дата обращения: 14.09.2024). [SP 91.13330.2012. Set of rules. Underground mine workings. Updated version of SNiP II-94-80" (approved by Order of the Ministry of Regional Development of Russia dated June 30, 2012 № 283) (as amended on December 17, 2021). Available from: docs.cntd.ru/document/1200095532 (In Russ.)].
15. Рыльникова МВ, Сахаров ЕМ, Неугомонов СС. Выбор типа и обоснование конструкции анкерной крепи горных выработок при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле.* 2023;(3):279–292. [Rylnikova MV, Sakharov EM, Neugomonov SS. Selection of type and justification for the design of rock bolts for mine workings in the development of deep-seated deposits of potassium salts. *Izvestia of Tula State University. Geosciences.* 2023;3:279-92 (In Russ.)].
16. Рыльникова МВ, Есина ЕН, Сахаров ЕМ, Бергер РВ. Закономерности геодинамических явлений при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений калийно-магниевого солей. *Горная промышленность.* 2023;(1):89–94. [Rylnikova MV, Esina EN, Sakharov EM, et al. Regularities of geodynamic phenomena during the development of deep-lying complex-structural deposits of potassium-magnesium salts. *Mining.* 2023;(1):89-94 (In Russ.)]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-89-94.
17. Барях АА, Санфиров ИА, Федосеев АК. [и др.]. Сейсмогеомеханический контроль водонепроницаемых толщ калийных рудников. *Журнал горных наук.* 2017;53(6):981–992. [Baryakh AA, Sanfirov IA, Fedoseev AK, et al. Seismic-geo-

mechanical control of waterproof strata of potash mines. *Journal of Mining Sciences*. 2017;53(6):981-92 (In Russ.)). DOI: 10.1134/S1062739117063041.

18. Токсаров ВН, Морозов ИА, Бельтюков НЛ, Ударцев АА. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;(7):113–124. [Toksarov VN, Morozov IA, Beltyukov NL, et al. Deformation of underground workings in the conditions of the Gremyachinskoe potassium salt deposit. *Mining information and analytical bulletin*. 2020;(7):113–24 (In Russ.)). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.

19. Морозов ИА. Обеспечение устойчивости горных выработок в условиях строящихся калийных рудников. *Горное эхо*. 2019;2(75):50–53. [Morozov IA. Ensuring the stability of mine workings in the conditions of potassium mines under construction. *Mining echo*. 2019;2(75):50–3 (In Russ.)). DOI: 10.7242/echo.2019.2.11.

20. Морозов ИА, Паньков ИЛ, Токсаров ВН. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;(9):36–47. [Morozov IA, Pankov IL, Toksarov VN. Stability of underground holes in salt massifs. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;9:36–47 (In Russ.)). DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Дмитрий Сергеевич Лепетюха — старший преподаватель Белгородского государственного национального исследовательского университета НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия, e-mail: lepetyukha_d@bsu.edu.ru; младший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород, Россия, e-mail: lepetyukha.dima@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1320-0559>



Сергей Дмитриевич Яцыняк — старший преподаватель Белгородского государственного национального исследовательского университета НИУ «БелГУ», e-mail: yatsynyak@bsu.edu.ru; ведущий инженер Всероссийского научно-исследовательского института ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород, Россия, e-mail: syatsenyuk65@mail.ru



Игорь Владимирович Синица — заведующий лабораторией горного давления и сдвига горных пород Всероссийского научно-исследовательского института ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород, Россия, e-mail: lgsd@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy S. Lepetyukha — senior lecturer of the Belgorod State National Research University NRU «BelSU», e-mail: lepetyukha_d@bsu.edu.ru; junior researcher of the All-Russian Research Institute OJSC «VIOGEM», Belgorod, Russian Federation, e-mail: lepetyukha.dima@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1320-0559>

Sergey D. Yatsynyak — senior lecturer of the Belgorod State National Research University NRU «BelSU», e-mail: yatsynyak@bsu.edu.ru; lead engineer of the All-Russian Research Institute OJSC «VIOGEM», Belgorod, Russian Federation, e-mail: syatsenyuk65@mail.ru

Igor V. Sinitsa — Head of the Laboratory of Rock Pressure and Rock Displacement of the All-Russian Research Institute OJSC «VIOGEM», Belgorod, Russian Federation, e-mail: lgsd@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Д. С. Лепетюха — написание основного текста статьи, развитие метода исследования, обработка и анализ результатов исследования; С. Д. Яцыняк — развитие метода исследования, исправление рукописи, формулировка выводов; И. В. Синица — постановка задачи исследования, разработка метода исследования / D. S. Lepetyukha — writing the main text of the article, development of the research method, processing and analysis of research results; S. D. Yatsynyak — development of the research method, correction of the manuscript, formulation of conclusions; I. V. Sinitsa — formulation of the research problem, development of the research method.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ю. П. Галченко

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова
Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация: На основе обработки и когнитивного анализа результатов натурных наблюдений за развитием процессов техногенной деградации фитоценозов природных экосистем хвойно-широколиственных лесов, граничащих с объектами инфраструктуры поверхностного комплекса рудников, выявлены закономерности изменения показателей видового разнообразия флоры при различной форме этой инфраструктуры. Было установлено, что характер и интенсивность изменений состояния биоты определяется не величиной характерных для горных работ техногенных факторов, а взаимным расположением промышленной и селитебной составляющих в составе поверхностного комплекса.

Ключевые слова: недропользование, развитие антропосферы, техногенное поражение и деградация естественной биоты, видовое разнообразие, инфраструктура, горное предприятие, поверхностный комплекс, флора, энтомофауна, методика, проектирование

Благодарность: автор выражает благодарность лаборатории № 1.2 отдела теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр Института проблем комплексного освоения недр им. ак. Н. В. Мельникова РАН. Исследование выполнено в рамках Госзадания FMMS-2024-0010/2024-2028 Института проблем комплексного освоения недр им. ак. Н. В. Мельникова РАН.

Для цитирования: Галченко Ю. П. Влияние структуры нарушенных земель на экологические последствия недропользования при разработке рудных месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 100-104. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_100_104.

THE INFLUENCE OF THE DISTURBED LAND STRUCTURE ON THE ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF SUBSURFACE USE IN THE DEVELOPMENT OF ORE DEPOSITS

Yu. P. Galchenko

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

Abstract: Introduction. Intensification of subsurface use is an obligatory and necessary condition for the constant and, unfortunately, uncontrolled expansion of reproduction of all kinds of material goods and infrastructure systems that ensure the well-being of the rapidly growing population of our planet. The geological setting of the location of ore deposits leads to the fact that mining enterprises under construction and operated acquire the role of the vanguard of man-made intrusion into the natural biota of the Earth, and the degree of environmental danger of inevitable changes in this biota determines both the conditions of existence of natural biotopes in vast territories and the possibility of their restoration in the post-exploitation period. That is why the purpose of the study is constantly relevant — the features and dynamics of the course of digressive successions of specific phytocenoses in the zones of man-made impact of mining enterprises, depending on the structure and nature of the use of land allotments necessary for effective subsurface use.

Research results. Based on the processing and cognitive analysis of the results of field observations of the development of the processes of technogenic degradation of phytocenoses of natural ecosystems of coniferous-deciduous forests bordering the infrastructure facilities of the surface complex of mines, patterns of changes in the indicators of species diversity of flora with different forms of this infrastructure have been revealed.

Conclusion. The method of observing modern phytocenotic landscapes consisted in a route study of the mountain river basin and in the description of phytoecological profiles laid through the valley and adjacent slopes. Geobotanical descriptions of the forest association were made and the undergrowth of tree species from the accounting sites of 2,50 m was calculated. The distances between the profiles ranged from 2.5 to 4 km. The second-order profiles were laid through the valleys of some tributaries. To evaluate the measurements of the

natural environment, a method was used to compare the asymmetry of morphological structures. The construction of an underground mine in a single complex with residential infrastructure in the Partizanka River valley (Primorsky Krai) and its 57-year operation have radically changed the state of the initial phytocenoses. In general, it can be stated that the primary three-tiered broadleaf forest has transformed into a polydominant forest community of small-leaved species over a half-century period of man-made impact. After the removal of man-made and anthropogenic loads, successional development is likely to go in the direction of the formation of multi-breed plantations with a predominance of small-leaved species in this territory. That is, changes in the primary biota caused by the long-term existence of a mining enterprise combined with residential education have become largely irreversible. In many ways, an excellent picture of the influence of technogenic factors typical for mining was obtained during similar studies in the zone of technogenic impact developed by the combined method of the Vostok-2 tin-tungsten deposit, which is almost completely identical to the one considered above, both in terms of development conditions and the type of ecotope. The only difference is that the mine is located far enough from the village and is located in the protected area of one of the largest biosphere reserves, where any logging activity was prohibited. During the observations, geobotanical profiles were laid through the mine site and both slopes of the valley. The generalized results of the observations showed that, despite almost 40 years of operation of the deposit, a multi-breed three-tiered forest has been preserved in the valley, which practically does not differ in structure and species composition from the standard we have adopted.

Resume. It was found that with the separate location of mining and residential facilities in the immediate vicinity of the industrial site of the mine, the primary phytocenosis of the biota retained its identity, both in terms of species diversity and integral indicators of bioproductivity. This, in turn, allows us to assert that all the main environmental factors of geotechnology used at the enterprise during the underground refinement of balance reserves correspond in their magnitude to the width of the tolerance range of the structure-forming species of this plant community. When comparing and choosing mining technologies, the environmental consequences of the operation of a mining enterprise and auxiliary infrastructure formations must be considered in a differentiated manner.

Keywords: subsurface use, development of the Anthroposphere, anthropogenic damage and degradation of natural biota, species diversity, infrastructure, mining enterprise, surface complex, flora, entomofauna, methodology, design

Gratitude: Author expresses gratitude to Laboratory No. 1.2 of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development of the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences. The study was carried out within the framework of the FMMS State Task-2024-0010/2024-2028 The Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences.

For citation: Galchenko Yu. P. The influence of the disturbed land structure on the environmental consequences of subsurface use in the development of ore deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):100-104. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_100_104.

Введение

Интенсификация недропользования — обязательное и необходимое условие постоянного и, к сожалению, бесконтрольного расширения воспроизводства всевозможных материальных благ и инфраструктурных систем, обеспечивающих благосостояние быстро растущего населения планеты. Нарастающие при этом противоречия между потребностями антропосферы и доступными ресурсными возможностями литосферы при действующей ныне технологической парадигме, основанной на экстенсивном развитии минерально-сырьевого комплекса, выражаются в форме быстрой и чаще всего необратимой деградации естественной биоты Земли [1–3].

Геологическая заданность расположения рудных месторождений приводит к тому, что строящиеся и эксплуатируемые горные предприятия обретают роль авангарда техногенного вторжения в естественную биоту Земли, а степень экологической опасности неизбежных изменений этой биоты определяет, как условия существования естественных биотопов на огромных территориях, так и возможности их восстановления в постэксплуатационный период. Именно поэтому постоянно актуальна цель исследования — особенности и динамика протекания дигрессивных сукцессий конкретных фитоценозов в зонах техногенного воздействия горных предприятий в зависимости от структуры и характера использования земельных отводов, необходимых для эффективного недропользования.

Материал и методы исследования

В основу общей методологии исследования были положены принципы *sustainable development*, которые в нашей стране

трактуются как стратегия устойчивого развития природы и общества [4, 5]. Методические сложности при использовании таких подходов в сфере освоения недр заключаются в том, что вся система критериев, регламентирующих техногенные воздействия на естественную биоту, формируется на основе сбора и анализа биологических показателей и параметров, а все возможности исполнения определяемых при этом ограничений полностью зависят от структуры технологического кластера в природно-технической системе недропользования [6–9].

Характер динамики техногенной деформации структуры фитоценозов природных экосистем в зоне влияния добывающих предприятий с распределенной селитебной инфраструктурой был установлен на основе обработки результатов, приведенных ранее экспедиционных исследований по изучению смешанных хвойно-широколиственных лесов [10, 11]. Были рассмотрены два объекта: подземный — рудник, добывающий около 1 млн т руды в год, с примыкающим к нему поселком городского типа и предприятие с комбинированной отработкой рудного месторождения, добывающее около 2 млн т горной массы в год, но расположенное на значительном удалении от однотипного с предыдущим объекта селитебной инфраструктуры.

Исследование процессов самовосстановления фитоценозов производились в зоне техногенного поражения, примыкающей к промплощадке рудника, а также и в зоне влияния селитебного образования, связанного с данным предприятием.

Методика наблюдений за современными фитоценозными ландшафтами заключалась в маршрутном исследовании бассейна горной реки и описании фитоэкологических профилей, заложенных через долину и примыкающие склоны. Были сделаны геоботанические описания лесной ассо-

циации и произведен подсчет подроста древесных пород из учетных площадок 2×50 м. Расстояния между профилями колебались от 2,5 до 4 км. Профили второго порядка закладывались через долины некоторых притоков [9, 10].

Для оценки измерений природной среды использована методика сравнения асимметрии морфологических структур [11].

Эталонные коренные растительные сообщества долинных и горных лесов были описаны в работах [12–14], которые выполнены до начала строительства рассматриваемых добывающих предприятий. Сведения о видовом составе характеристик этих эталонных лесных сообществ приведены в таблице 1.

Результаты и их обсуждение

Строительство подземного рудника в едином комплексе с жилой инфраструктурой в долине реки Партизанки (Приморский край) и его 57-летняя эксплуатация коренным образом изменили состояние исходных фитоценозов.

Долинные леса в пределах земельного отвода предприятия были полностью уничтожены, а за его пределами тополево-чозениевые насаждения повсеместно заменены сплошными зарослями ольхи пушистой с очень небольшой примесью ивы обыкновенной (Ив) и единичными чозениями (рис. 1) (см. цветную вклейку на стр. 83), высота которых не превышает 4–5 м. На отдельных надпойменных участках террасы при полном доминировании ольхи встречаются отдельные группы ореха, кленов, сирени, ясени и ильма. Однако эти виды явно не имеют перспективы самовосстановления, так как по всей исследованной территории удовлетворительный подрост наблюдается только у ольхи пушистой.

При проведении исследования морфологической структуры хвойно-широколиственных лесов горных склонов было выделено лишь два типа насаждений, которые можно считать производными от первичного лесостоя (рис. 2) (см. цветную вклейку на стр. 83).

В нижней части склонов, примерно до их середины, идентифицирован многопородный лиственный лес из березы маньчжурской и желтой, осины, липы и различных видов

кленов с незначительной примесью пород первичного лесостоя в виде единичных перестойных экземпляров или очень редких групп уже высокого подроста. Часто наблюдается суховершинность отдельных деревьев.

В верхней половине склонов явно доминирует береза желтая, клен маньчжурский, клен зеленокорый и ильм лопастный с примесью пихты черной. По гребню хребта зафиксирован диморфант, а также — мелкоплодник и береза Шмидта.

В целом можно констатировать, что первичный трехъярусный широколиственный лес за полувековой период техногенного воздействия трансформировался в полидоминантное лесное сообщество мелколиственных пород. Кроме того, следует отметить, что почти по всем заложенным профилям выявлено значительное количество погибших пихт и кедров, что вместе с усилением роли осины и березы желтой и появлением в видовом составе березы маньчжурской свидетельствует о том, что насаждения на данной территории неоднократно испытывали влияние антропогенных вырубок и пожаров слабой и средней интенсивности.

Установлено, что крайне сложный рельеф склонов основной долины и изрезанность этих склонов притоками второго и третьего порядков, способствовали тому, что в наиболее труднодоступных местах сохранились достаточно обширные участки леса, близкого по своему составу к принятому эталону. Эти участки занимают не более 5–6 % общей площади техногенного поражения и скорее всего не могут сыграть позитивную роль на первой стадии самовосстановления биоты в постэксплуатационный период существования рудника. Об этом свидетельствует также анализ структуры и динамики подроста видов вторичного фитоценоза в зоне техногенного воздействия (рис. 3) (см. цветную вклейку на стр. 83).

Из рисунка видно, что после снятия техногенных и антропогенных нагрузок сукцессионное развитие, скорее всего, пойдет в направлении формирования на этой территории многопородных насаждений с преобладанием мелколиственных пород. То есть изменения первичной биоты, вызванные длительным существованием добывающего

Таблица 1 / Table 1

Видовая структура состояния исходного фитоценоза в зонах расположения рассмотренных добывающих предприятий /
The specific structure of the state of the initial phytocenosis in the zones of location of the considered mining enterprises

Ярус / Tier	Породный состав / Breed composition	Характеристики / Specifications			Доля в ярусе / Share in the tier, %	Доля в общем лесостое / Share in the total wooded area, %
		Высота / Height	Диаметр / Diameter	Сомкнутость полога / The closeness of the canopy		
Долинные леса / Valley forests						
I	Чз + Тм + Ясм / Chtz + Tm + Yasm	25; 22; 22	30–50	0,7	60; 20; 20	31; 10; 9
II	Ясн + Клм + Клмж + Са + Оп + Ил / Clear + Klm + Klmj + Sa + Op + Il	10–15	8–10	0,65	30; 30; 10; 20; 5; 5	15; 18; 5; 6; 2; 1
Многопородные леса горных склонов / Multi-breed forests of mountain slopes						
I	Кк + Пч / Kk + Pch	28–30	50–60	0,3–0,4	60; 40	20; 13
II	Лп + Бж + Бх + Клм + Ор / Lp + Bj + Bh + Klm + Or	20–22	30–40	0,5–0,6	30; 20; 10; 30; 10	11; 6,5; 3,5; 10; 3; 3
III	Клиз + Клмж + Гр + Са + Илд / Kliz + Klmj + Gr + Sa + Ild	6–7	10–16	0,2–0,4	30; 20; 40; 5; 5	10; 6,8; 13; 1,6; 1,7

Примечание. Чз – чозения; Тм – тополь Максимовича; Ясм – ясен маньчжурский; Ясн – ясен носолистный; Клм – клен моно; Са – сирень амурская; Оп – ольха пушистая; Ил – ильм лопастный; Ор – орех маньчжурский; Кк – кедр корейский; Пч – пихта черная; Лп – липа амурская; Бж – береза желтая; Бх – бархат амурский; Клиз – клен ложнозибольдов; Клмж – клен маньчжурский; Гр – граб сердцелистный; Илд – ильм долинный / Cz – chozeniya; Tm – Maksimovich poplar; Yasm – Manchurian ash; Yasn – Nosy ash; Klm – Mono maple; Sa – Amur lilac; Op – alder; Il – Lobed ilm; Or – Manchurian walnut; Kk – Korean cedar; Bee – Black Lp – Amur linden; Bj – Yellow birch; Bh – Amur velvet; Kliz – Lozhnozibold maple; Klmj – Manchurian maple; Gr – Cordial hornbeam; Ild – Valley elm.

предприятия, совмещенного с селитебным образованием, приобрели в значительной мере необратимый характер.

Во многом отличная картина влияния типичных для горного производства техногенных факторов была получена при проведении аналогичных исследований в зоне техногенного воздействия разрабатываемого комбинированным способом олововольфрамового месторождения «Восток-2», которое практически полностью идентично рассматриваемому выше как по условиям разработки, так и по типу экотопа. Единственное различие заключается в том, что здесь рудник находится достаточно далеко от поселка и располагается в охранной зоне одного из крупнейших биосферных заповедников, где была запрещена любая лесозаготовительная деятельность. При проведении наблюдений геоботанические профили были заложены через промплощадку рудника и оба склона долины.

Обобщенные результаты наблюдений показали, что, несмотря на почти 40 лет эксплуатации месторождения, в долине сохранился многопородный трехъярусный лес, практически не отличающийся по структуре и видовому составу от принятого нами эталона (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Видовая структура хвойно-широколиственного леса в зоне
Техногенного воздействия рудника «Восток-2» /
Species structure of coniferous-deciduous forest in the zone
of technogenic impact of the Vostok-2 mine**

Ярус / Tier	Основной видовой состав / The main species composition	Высота, м / Height, m	Диаметр, см / Diameter, cm	Сомкнутость покрова / The closeness of the canopy
I	6 Кк + 2 Пц + 2 Пч / 6 Кк + 2 Рс + 2 Рг	28-30	50-55	0,4-0,55
II	3 Бж, 2 Лп, 1 Бх, 3 Клм, 1 Илд + Ор / 3 Bj, 2 Lp, 1 Bx, 3 Klm, 1 Ild + Or	18-20	25-35	0,5-0,6
III	3 Клмж, 2 Клиз, 3 Гр, 1 Са, 1 Илд / 3 Klmj, 2 Kliz, 3 Gy, 1 Sa, 1 Ild	6-10	12-14	0,1-0,2

Примечание. Пц – пихта цельнолистная / Рс – whole-leaved fir.

Из таблицы следует, что видовой и возрастной состав ярусов лесного растительного сообщества соответствует условиям нормального развития всей лесной экосистемы, а вызываемые непосредственным действием техногенных факторов

данного предприятия изменения находятся в пределах диапазона толерантности основных структурообразующих (или эдификаторных) видов данного растительного сообщества. Экологический ущерб в этом случае ограничивается только размерами земельного отвода.

Заключение

Установлено, что при долговременном функционировании единичного рудника с прилегающим рабочим поселком размер зоны техногенного поражения биоты намного превышает размеры земельного отвода. По всей площади этой зоны отмечено замещение трехъярусного хвойно-широколиственного леса на двухъярусный лиственный лес, а в прирусловой полосе водотока первичный фитоценоз практически полностью вытеснен зарослями ольхи пушистой.

Показано, что техногенная деградация коренного лесного сообщества связана не с полномасштабным вытеснением структурообразующих видов, а носит форму изменения ценотического статуса определенных групп видов. В результате антропогенного уничтожения (вырубки) видов первого яруса изменился ценотический статус видов второго и третьего ярусов практически без изменения структуры видового состава.

Установлено, что при раздельном расположении горно-технического и селитебного объектов в непосредственной близости от промплощадки рудника первичный фитоценоз биоты сохранил идентичность как в плане видового разнообразия, так и по интегральным показателям биопродуктивности. Это, в свою очередь, позволяет утверждать, что все основные экологические факторы геотехнологии, применяемой на предприятии при подземной доработке балансовых запасов, по величине соответствуют ширине диапазона толерантности структурообразующих видов данного растительного сообщества.

Сравнительный анализ характера техногенных изменений одинаковой природной среды двумя горными предприятиями с разноудаленной селитебной инфраструктурой показал, что при сравнении и выборе горных технологий экологические последствия от функционирования добывающего предприятия и вспомогательных инфраструктурных образований необходимо рассматривать дифференцированно. Это позволит более обоснованно принимать горно-технические решения в современных условиях перехода к экологизации общей технологической парадигмы как горнорудной отрасли, так и недропользования в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды РФ в 2022 году. Минприроды России, НПП. М., 2022. 844 с. [Ministry of Natural Resources of Russia, NPP. State report on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2022. Moscow, 2022. (In Russ.)].
2. Трубецкой КН, Галченко ЮП. Природоподобная технология комплексного освоения недр – проблемы и перспективы. М.: Научтехлитиздат, 2020. 367 с. [Trubetskoy KN, Galchenko YuP. Nature-like technology of integrated development of the subsoil – problems and prospects. Moscow, 2020 (In Russ.)].
3. Моисеев НН. Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1990. 351 с. [Moiseev NN. Man and the noosphere. Moscow, 1990 (In Russ.)].
4. Хван ТА. Экологические основы природопользования. М.: Юрайт, 2019. 253 с. [Hwang TA. Ecological foundations of nature management. Moscow, 2019 (In Russ.)].
5. Бодрийяр Ж. Фатальные стратегии. М.: Рипол-классик, 2019. 352 с. [Badriyar J. Fatal strategies. Moscow, 2019 (In Russ.)].

6. Галченко ЮП, Еременко ВА. Природно-технические системы подземной разработки рудных месторождений на основе конвергентных горных технологий. М.: Горная книга, 2023. 288 с. [Galchenko YuP, Eremenko VA. Natural and technical systems of underground mining of ore deposits based on convergent mining technologies. Moscow, 2023 (In Russ.).]
7. Hacker PW, Coops NC, Laliberte E, et al. Variations in accuracy of leaf functional trait prediction due to spectral mixing. *Ecological Indicators*. 2022;136:108687.
8. Krupskaya LT, Filatova MY, Kolobanov KA, et al. Remote sensing for environmental safety of forest ecosystems within the tailings impact of a closed tin ore company. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;806(1):012017. DOI:10.1088/1755-1315/806/1/012017.
9. Galchenko Yu, Ozaryan Yu. Method of quantitative assessment of the regularities of natural restoration of biota in zones of technogenic disturbance by extractive enterprises. *E3S Web Conf*. 2018;56:04006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185604006>.
10. Navarro A, Young M, Allan B, et al. The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate aboveground biomass of mangrove ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2020;242:111747. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111747.
11. Yang X, Li F, Fan W, et al. Evaluating the effectiveness of wind protection by windbreaks based on remote sensing and geographic information systems. *Agroforestry Systems*. 2021;95:353-65. DOI: 10.1007/s10457-021-00594-x.
12. Климина ЕМ, Остроухов АВ. Ландшафтно-экологическое зонирование муниципальных районов (на примере Хабаровского края). *Региональные проблемы*. 2022;25(3):28–30. [Klimina EM, Ostroukhov AV. Landscape and ecological zoning of municipal districts (on the example of the Khabarovsk Territory). *Regional problems*. 2022;25(3):28-30. (In Russ.)]. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-28-30.
13. Озарян ЮА. Оценка естественного восстановления биоты в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Хабаровского края по данным спутникового мониторинга. *Горный журнал*. 2018;(10):84–88. [Ozaryan YuA. Assessment of the natural restoration of biota in the zone of impact of mining enterprises of the Khabarovsk Territory according to satellite monitoring data. *Mining Journal*. 2018;(10):84-8]. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.16 (In Russ.).]
14. Озарян ЮА, Бубнова МБ, Усиков ВИ. Методика дистанционного мониторинга природно-технических систем (на примере горнопромышленных районов юга Дальневосточного региона). *Горный журнал*. 2020;(2):84–89. [Ozaryan YuA, Bubnov MB, Usikov VI. Methods of remote monitoring of natural and technical systems (on the example of mining regions of the south of the Far Eastern region). *Mining Journal*. 2020;(2):84-9 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.13.
15. Саулова ТА, Бас ВИ. Техносферная безопасность. Красноярск: Изд. СибГУ, 2021. 86 с. [Saulova TA, Bas VI. Technosphere safety. Krasnoyarsk, 2021 (In Russ.)].
16. Туктамышев ИР, Широких ПС, Муллагулов РЮ. Об информативности спектральных каналов и NDVI спутника ДЗЗ Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ для оценки стадий зарастания леса заброшенных сельскохозяйственных территорий. *Экобиотех*. 2021;4(3):178–185. [Tuktamyshev IR, Shirokikh PS, Mullagulov RYu. On the information content of spectral channels and NDVI of the remote sensing satellite Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ for assessing the stages of overgrowth of forests in abandoned agricultural areas. *Ecobiotech*. 2021;4(3):178-85 (In Russ.)]. DOI: 10.31163/2618-964X-2021-4-3-178-185.
17. Будищев АФ. Описание лесов Приморской области. Главные официальные документы по управлению Восточной Сибирью. Изд. 2-е. Хабаровск, 1898. 465 с. [Budishchev AF. Description of the forests of the Primorsky region. The main official documents on the management of Eastern Siberia. 2nd edition. Khabarovsk, 1898 (In Russ.)].
18. Комаров ВЛ. Типы растительности Южно-Уссурийского края. Труды почвенно-ботанической экспедиции Росс. академии наук. М., 1917. 260 с. [Komarov VL. Vegetation types of the South Ussuri region. Proceedings of the Ross Soil and Botanical Expedition. Academy of Sciences. Moscow, 1917 (In Russ.)].
19. Пржевальский ИМ. Путешествия в Уссурийский край 1867–69 гг. М., 1937. 467 с. [Przhevalsky IM. Travels to the Ussuri region 1867-69. 2nd edition. Moscow, 1937 (In Russ.)].
20. Колесников БИ. Кедровые леса Дальнего Востока. Л.: АН СССР, 1956. 262 с. [Kolesnikov BI. Cedar forests of the Far East. Leningrad, 1956 (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Юрий Павлович Галченко –
доктор технических наук, профессор, член-корр.
Российской экологической академии, главный
научный сотрудник отдела горной экологии,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. ак. Н. В. Мельникова Российской академии
наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail:
schtrek33@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Yury P. Galchenko –
Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding member
Russian Academy of Ecology, Chief Researcher of
the Department of Mountain Ecology, Institute of
Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian
Federation, e-mail: schtrek33@mail.ru

ENVIRONMENTAL MONITORING IN INDUSTRIAL ZONES OF WEST AFRICA

Ameen Babatunde A.¹, Ajayi Adedayo O.²

¹Roygbiv Analytical and Environmental Services Limited, Ilorin, Kwara State, Nigeria

²Adekunle Ajasin University, Centre for Infectious Disease Control and Drug Development (CIDCDD) AAUA, Akungba-Akoko, Ondo State, Nigeria

Abstract: Environmental monitoring is essential for assessing the status and supporting development policies related to soil, air, and water quality. This study focuses on Drury Industries Limited, established in 1986, which is one of West Africa's leading manufacturers of Aluminium sulfate and sulfuric acid. The company operates multiple production lines, including Sulfuric Acid Plant I (52,000 MT/year), Sulfuric Acid Plant II (60,500 MT/year), and Aluminium sulfate (90,000 MT/year). The sulfuric acid produced is a crucial raw material, enhancing in various industrial processes. Located on 177,145 m² at Plot 9/18, Opic Industrial Estate, Agbara, Ogun State, the facility's coordinates are N06032'28.1" E003o04'36.1". This study evaluates various physicochemical parameters that impact human health, productivity, and relevant meteorological data. The will not only safeguard health but also serve as a reference for similar industrial sites. By publishing this data in the Journal "Mine Surveying and Subsurface Use" we aim to a gap, as many relevant studies in Sub-Saharan Africa remain unpublished. This research will aid in preserving and protecting essential resources within complex environments.

Keywords: Environment, Universal, Health, Industrial, Monitoring

For citation: Ameen Babatunde A., Ajayi Adedayo O. Environmental monitoring in industrial zones of West Africa. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):105-113. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_105_113.

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗОНАХ ЗАПАДНОЙ АФРИКИ

Амин Бабатунде А.¹, Аджайи Адедайо О.²

¹Компания Ройгбив Аналитические и экологические услуги, г. Илорин, штат Квара, Нигерия

²Университет Адекунле Аджасин, Центр по борьбе с инфекционными заболеваниями и разработке лекарственных средств (CIDCDD) AAUA, г. Акунгба-Акоко, штат Оndo, Нигерия

Аннотация: Мониторинг окружающей среды необходим для оценки состояния и поддержки стратегии развития, связанной с качеством почвы, воздуха и воды. В данном исследовании основное внимание уделяется компании Drury Industries Limited, основанной в 1986 году, которая является одним из ведущих производителей сульфата алюминия и серной кислоты в Западной Африке. Компания управляет несколькими производственными линиями, включая завод по производству серной кислоты I (52000 тонн в год), завод по производству серной кислоты II (60500 тонн в год) и сульфата алюминия (90000 тонн в год). Производимая серная кислота является важнейшим сырьем, повышающим эффективность различных промышленных процессов. Расположенный на участке 9/18, Opic Industrial Estate, Agbara, штат Огун, площадью 177145 м², объект имеет координаты N06032'28.1" E003o04'36.1". В данном исследовании оцениваются различные физико-химические параметры, которые влияют на здоровье человека, производительность и соответствующие метеорологические данные. Результаты не только защитят здоровье, но и послужат справочным материалом для аналогичных промышленных объектов. Публикуя эти данные в журнале Маркшейдерия и недропользование, мы стремимся заполнить пробел, поскольку многие соответствующие исследования в странах Африки к югу от Сахары остаются неопубликованными. Данное исследование поможет сохранить и защитить основные ресурсы в сложных условиях.

Ключевые слова: окружающая среда, общемировая, здоровье, промышленный, мониторинг

Для цитирования: Амин Бабатунде А., Аджайи Адедайо О. Мониторинг окружающей среды в промышленных зонах Западной Африки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 105-113. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_105_113.

Introduction

There are various techniques that can be intensified to enhance robust environmental monitoring, as reported by Kumar et al. (2013) [1]. Environmental monitoring can be done to recover valuable resources embedded in the earth's crust or in our biosphere environment inhabited by humans and different types of microorganisms. These are done in ways that our planet Earth will not be degraded. Industrial zones or establishments visited for this purpose include a big firm known as Drury Industries Limited that was incorporated by the Corporate Affairs Commission of the Federal Republic of Nigeria on the 27th of July, 1982, with registration number RC 39426.

Drury Industries Ltd was established in 1986 as one of the largest and pioneering manufacturers of Aluminium sulphate and Sulphuric acid on the West Coast of Africa. The company is a good example of self-reliance in the heavy chemicals manufacturing industry. The factory production lines (plant) include Sulphuric acid plant I (production capacity of 52,000 MT/Annum), Sulphuric acid plant II (production capacity of 60,500 MT/Annum), and Aluminium sulphate (production capacity of 90,000 MT/Annum).

The sulphuric acid produced in the acid plant is considered an invaluable raw material and is known to improve efficiency in numerous industrial processes. The facilities are located on the land area of 177,145 m² at Plot 9/18, Opic Industrial Estate, Agbara, Ogun State, with the following coordinates N06032'28.1" E00304'36.1"; N06032'30.3", E00304'38.5"; N06032'30.5", E00304'38.3"; and N06032'28.8" E00304'39.2".

Before the last decade of the 20th century, not much emphasis was placed on the management of the environment in a global and internationally sustainable way. However, the increasing awareness of global warming, land, water, and air pollution by industries and other service providers have engendered international collaboration through conventions and treaties culminating in the enactment of national and local laws and regulations to ensure the mitigation of pollution in the environment [2-10].

The environment is a continuum, and the activities of one facility that generates waste and pollutants would ultimately affect its neighbor. It is in the realization of this that the Earth Summit was held in Rio de Janeiro, Brazil, in June 1992, where a declaration was made on Environment and Developments by the Government under the United Nations Agenda 21 (Programme of Action for Sustainable Development). Nigeria is a signatory to most of the conventions on environmental management and protection, and therefore both the national and state governments have enacted various laws and regulations to monitor and protect the environment from solid, liquid, gaseous wastes, and noise pollution. The scientific report by Dunkerley (2022) [11] provided vital information on the geological formations necessary for some amelioration and development.

Environmental monitoring describes the processes and activities that need to take place to characterize and monitor the quality of the environment. Environmental monitoring is a way to check the condition of an environment by comparing the results of investigations done at different times. In many circumstances in which human activities carry a risk of harmful effects on the natural environment, all monitoring strategies and programs have reasons and justifications, which are often designed to establish the current status of an environment or to establish trends in environmental parameters. In all cases, the results of monitoring will be reviewed, analyzed statistically, and published.

The study of Chueh et al. (2001) [12] described the possibility of using an electronic computerized system to optimize the detection and proper evaluation of some environmental components in the process of environmental monitoring systems.

Similarly, the use of some facilities described by Allil et al. (2021) [13] and Wang et al. (2021) [14] on earth seismic movements and earthquakes, including related scientific management structures, will go a long way to avert some disasters in the environment.

- Benefits of Environmental Monitoring:
- Protection of public water supplies;
- Urban air quality;
- Natural resources protection and management;
- Weather forecasting;
- Economic development and land planning;
- Endangered species and biodiversity;
- Global climate changes.

This report describes the environmental conditions in terms of air quality and noise level of Drury Industries Limited, Agbara, Ogun State, as of the time of this study. The data on the environmental conditions of the area were collected during the field survey, and the key findings are discussed here.

Objectives of the Study

The aims and objectives of the Environmental Monitoring Report:

1. To comply with statutory regulatory requirements of the Ogun State Ministry of Environment, Ogun State Environmental Protection Agency, Federal Ministry of Environment, Ogun State Land Bureau, Physical Planning, and other statutory regulatory regulations relating to the environment and property development.
2. To meet the international (Agenda 21) and National requirements for environmental practice in industries for sustainable development.
3. Determine whether facilities to minimize environmental impacts are adequate and cost-effective or whether other appropriate technologies should be introduced.

Scope of Study

1. Climatic Characteristics of Drury Industries environment.
2. Air Quality determination of Drury Industries premises and environs.
3. Effluent Results Log Sheet & Discussions (If applicable).
4. Soil Quality Determination & Discussions (If applicable).

Justification

In line with the environmental guidelines such organizations as OGEPA, NESREA, and FMEnv, Roygbiv Analytical and Environmental Services Limited were commissioned to carry out the air quality, dust emission, noise level, and meteorology of Drury Industries Limited, plot 9/18, Opic Industrial Estate, Agbara, Ogun state. The results are presented and discussed here.

Climatic Characteristics

DRURY INDUSTRIES LIMITED is located within the humid tropical climate with a moisture index range between -19.5 and +18.5 based on the Thornthwaite classification scheme. The position of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ) relative to the apparent location of the overhead sun and the prevailing winds at different periods of the year all combine to determine the observed weather and climatic characteristics. However, human activities, especially urbanization and industrialization, have caused the removal of the forest cover and the conversion of wetlands into urbanized landscapes. This has resulted in the modification of

the climatic parameters, especially evapotranspiration, humidity, and to a lesser degree, temperature.

Rainfall

The season is characterized by two major seasons, the dry and wet seasons. The wet season (April/October) is bimodal, with the highest peak occurring during May and July, then separated from the lower peak by August (August break). The rainfall regime, which is the pattern of rainfall distribution over the seasons, is determined by the two major air masses dominating the area: the moist Tropical Maritime (TM) with its associated westerlies and the dry Tropical Continental air mass (TC) with its associated easterlies. The movement of the ITCZ, a quasi-stationary boundary that separates the TC from the TM, further modifies the process. Rain falls on more than 7 (i.e. > 23 %) of the days in every month from May to October and on just less than 5 (i.e. > 16 %) days between November and February. Overall, a total of about 1970 mm of rain is recorded annually.

As shown in Table 1, this gives an average of 164.22 mm per month. The minimum rainfall amount (24.25 mm) is received in the month of December while the maximum rainfall amount (320.42 mm) is received in the month of June (Figure 1). Of the total amount, about 1,792.49 mm was recorded during the wet season (April to October) while only 178.45 mm was recorded in the “dry” season (November to March).

Table 1 / Таблица 1

Climatic Characteristics of the Facility Area (Source: NiMet, 2019) /
Климатические характеристики района расположения объекта
(Источник: NiMet, 2019)

Month	Temperature °C			Rainfall (mm)	Humidity (%)	
	Min	Mean	Max		10:00 Hrs	16:00 Hrs
January	21.56	25.75	29.94	26.12	93	66
February	26.42	27.21	28.00	25.89	87	64
March	24.52	26.32	28.11	101.89	79	71
April	25.78	27.31	28.84	162.02	89	70
May	21.85	25.93	30.00	210.21	92	74
June	23.58	25.28	26.98	291.54	91	83
July	22.69	24.85	27.01	320.42	96	77
August	24.11	25.48	26.85	192.54	95	81
September	23.25	25.18	27.10	287.25	94	80
October	22.98	25.20	27.41	250	92	79
November	22.70	25.91	29.12	78.51	95	75
December	24.11	26.53	28.95	24.25	92	65
Total	283.55	310.93	338.31	1970.64	1095.00	885.00
Mean.	23.63	25.91	28.19	164.22	91.25	73.75
Min	21.56	24.85	25.30	24.25	79.00	64.00
Max	26.42	27.31	29.00	320.42	95.00	83.00

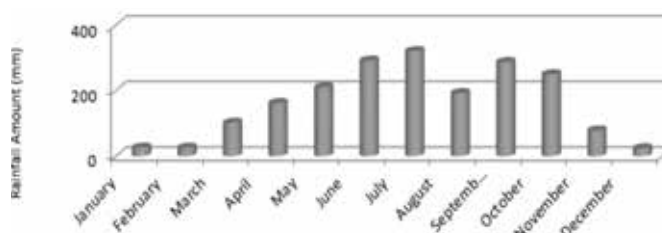


Fig. 1. Rainfall Characteristics of the Facility Area
Рис. 1. Характеристики осадков на объекте

Temperature

The project site is located at approximately latitude 6°32'00"N of the equator. Therefore, the temperature remains relatively high and stable throughout the year, with significant variations during the wet, dry, and short “harmattan” and “break between the two rainfall peaks” periods. The average daily temperature for the entire year is 25.91 °C. The harmattan season occurs when the northeast trade wind passes over the Sahara Desert into the West African region, typically between December and January.

Figure 2 illustrates the temperature patterns in the facility area.

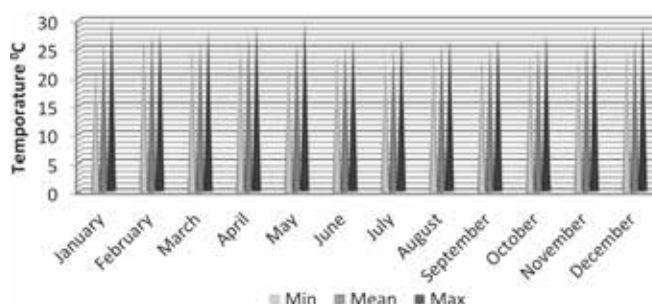


Fig. 2. Characteristics of Daily Temperature within the Facility Area
Рис. 2. Характеристики суточной температуры на территории объекта

Relative Humidity (RH)

The region is characterized by a relatively high humidity RH as a result of the prevailing TM air mass blowing over the environment almost all year round. Overall averages of 91.25 % and 73.75 % are recorded at 10:00 hrs and 16:00 hrs local time. Further assessment shows that the highest values are recorded in early mornings and late evenings while the lowest value of 64 % in the region is recorded in February. During the dry season, values between 65 % and 85 % are common, owing to the influences of the Dry Tropical Continental air mass that prevails over the region at this period.

Figure 3 shows the characteristics of relative humidity of the project area.

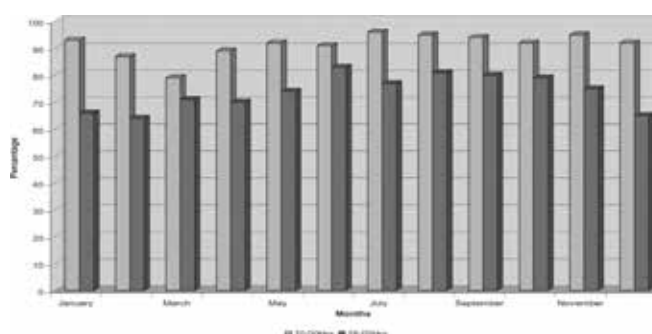


Fig. 3. Characteristics of Relative Humidity within the Facility Area
Рис. 3. Характеристики относительной влажности в районе объекта

Sunshine Hours

The mean annual sunshine hour in the area is about 1,537 hours. The mean monthly values vary between 51 and 170 hours in the months of July and December, respectively. The generally low amount of sunshine hours in July is due to the greater amount of cloudiness and rainfall characteristics of the area. Conversely, the higher December figure is due to the prevalent clear skies when the ITCZ has once more started its northward migration.

Wind Patterns

The wind pattern also follows the migratory ITCZ. Thus, it is mainly southwesterly during the rainy season and northeasterly

during the dry season. In general, the southwesterly swell is prevalent. The wind speed varies between 3 and 8 knots around the coast for most of the year with an average speed of 6 knots. Incidences of severe storms are now more frequent, with some rare occasions reaching as high as 55–60 knots. These are often associated with thunder and lightning, especially during changing seasons.

Air Quality Determination

Air Quality is an indication of the healthfulness of the air based on the quantity of polluting gases and particulates (liquid droplets or tiny solid particles suspended in the air) it contains. Air is considered safe when it contains no harmful chemicals and only low levels of other chemicals that become harmful in higher concentrations to humans, other animals, plants, or their ecosystems. Controlling air pollution has become extremely challenging with the enormous increase in emissions from energy-intensive industries. In view of this, the Federal Ministry of Environment (FMEnv) and the National Environmental Standards and Regulatory Enforcement Agency (NESREA) have established air quality standards to protect the health and welfare of people, plants, animals, as well as buildings, movements, water resources, etc. Drury Industries Limited therefore commissioned Roygbiv Analytical and Environmental Services Nigeria Limited to monitor the air quality, dust emission, noise level, and illumination of its factory at Plot 9/18 Opic Industrial Estate, Agbara, Ogun State on 28th September 2022, and the results are hereby presented and discussed in this report.

Reference Standard

The National Environmental (Chemical, Pharmaceutical, Soap, and Detergent Manufacturing Industries) Regulations, S.I. 36 of 2009; National Environmental Protection (Effluent Limitation) Regulations, S.I. No. 8 of 1991, and National Environmental (Noise Standards and Control) Regulations, S.I. No. 35 of 2009 were used for the discussion of the results.

Sampling

Ambient air quality and noise were monitored using calibrated portable gas analyzers and meters by monitoring experts.

The method of collecting samples is shown in Table 2.

Table 2 / Таблица 2

Method for Sample Collection and Equipment Detection Limit / Метод сбора проб и порог чувствительности оборудования

No.	Parameters	Equipment/Meter	Detection Limit
1.	Noxious gasses	Multifunctional Gas Detector – GT-2000-JMDE	O ₂ Sensor
			0-25 % Vol
			CO Sensor
			0-100 ppm
			CO ₂ Sensor
			0-5000 ppm
			H ₂ S Sensor
2.	Total Particulate Matter (2.5,10.0um)	HTI Particle Counter (HT-9600)	0-100 ppm
			SO ₂ Sensor
			0-10 ppm
			NO Sensor
			0-250 ppm
3.	Temperature	Extech Digital Light meter	CH ₄ Sensor
4.	Relative Humidity		0 – 100% LEL
5.	Illumination	Extech sound level meter	VOC Sensor
6.	Noise Level	Multi-functional Anemometer	0-100 ppm
7.	Windspeed		0 – 5000 ug/m ³
			-50 +300 0C
			20 – 99 %
			0 – 50,000 Lux
			35 – 130 dB
			0.4-45 m/s

Air Pollutants and Their Impacts

The major air pollutants and their effect are expressed in the Table 3 below.

Monitoring Results

The results of gas monitoring are shown in Table 4.

The results of meteorology and particulate matter are shown in Table 5.

The results of noise monitoring are shown in Table 6.

Findings on Air Quality

Air quality survey of strategic locations within the factory indicated that most of the monitored parameters were within specifications and were localized within the areas of generation. Details are given in Tables 4, 5 and 6.

H₂S, VOCs, NO and CH₄ (LEL) were not detected in the factory in compliance with NESREA specifications.

SO₂ was detected in the factory at a range of <0.001 to 22.5 mg/Nm³ which was within NESREA specification.

CO was detected in the factory at a range of 16.25 mg/Nm³ to 49.00 mg/Nm³ which was within NESREA specification.

CO₂ value in the factory varied from 738 ppm to 826 ppm.

O₂ value in the factory varied from 19.60 % to 19.92 % which is considered satisfactory and in abundance when compared with the 21 % natural composition.

The relative humidity measured in the facility varied from 60.8 % to 79.7 %. This is however considered satisfactory considering the prevalent temperature and weather in the area.

The temperature values in the facility ranges from 26.22 °C to 29.35 °C. The temperature values in most of the unit in the facility compared favorably with the ambient temperature of 28.96 °C. Considering the ambient temperature and weather, the temperature in the facility were normal.

The windspeed in the facility ranges from 0.4 m/s to 0.9 m/s. This is considered sufficient based on the prevalent climate and local geography.

PM2.5, PM10 and TPM detected in most of the locations in the facility were within the NESREA limits of 50 mg/Nm³ except at the Alum Plant (Milling, Crushing/Bagging unit) and Acid plant (Sulphur melting unit) where the value was higher than the limit. TPM was however localized in the area.

Noise level in the factory varies from 47.8 dB to 98.7 dB. The noise levels in most assessed locations in the factory were within NESREA specifications except at the Boiler house and Generator house which were above the limit.

Illumination measured in the facility ranges from 3 to 15600 Lux. Lighting in most of the locations was considered adequate with respect to the usage and the age of personnel on duty except at the boiler house and Alum Plant where the value was lower.

Recommendations on Air Quality

Management should intensify effort on the following to improve compliance:

- Regular and continuous servicing of machines and equipment to reduce smoke/dust emanating from them.
- Routine check and maintenance of process operations and equipment for continual improvement.
- Servicing of pollution abatement devices (cyclone, fume extractors and alkali scrubber) on a periodic and regular basis for reliable and effective performance.
- Tag the Generator / Boiler house as 'High Noise Area' and enforce the use of ear protecting equipment in the units.

Table 3 / Таблица 3

**Air Pollutants and Their Impacts /
Загрязнители воздуха и их воздействие**

Name	Properties of Importance	Significance as Air Pollutant	Physiological Effects on Humans	
			Acute Effects	Chronic Effects
Carbon Dioxide (CO ₂)	Colourless and odourless	Product of complete combustion of organic compounds, implicated in global climate change	Pulmonary inflammation	Displaces oxygen in air and cause suffocation
Carbon Monoxide (CO)	Colourless and odourless	Product of incomplete combustion, toxic at high concentration	Asphyxiation, heart and brain damage, impaired perception	Increased red blood cells (polycythemia) in blood, leading to increased resistance to blood to flow, weakness fatigue, and headaches
Ozone (O ₃)	Very reactive	Damage to vegetation and materials, produces photochemical smog	Decreased pulmonary function and right-heart stress	Emphysema, fibrosis, right-heart failure, aging of lung and respiratory tissue
Nitrogen Dioxide (NO ₂)	Brown or orange gas	Component of photochemical smog formation, toxic at high concentration	Incompletely understood, although cell membrane disruption appears to be the principal reason for respiratory tract edema	Cell membrane damage and acid-induced irritation leading to or contributing to diminished pulmonary function and right-heart stress
Nitric Oxide (NO)	Colourless, sometimes used in anesthetics	Produced during combustion and high temperature oxidation, oxidizes in air to NO ₂		
Закись азота (N ₂ O)	Colourless, used as aerosol carrier gas	Relatively inert; not a combustion product		
Sulfur Dioxide (SO ₂)	Colourless gas, intense acid odour, forms H ₂ SO ₄ in water	Damage to vegetation, building materials, respiratory system	Gives rise to irritation reactions, which cause capillaries to dilate and exude fluid; this leads to tissue fluid accumulation and swelling (edema), bronchial spasms, and shortness of breath. General physiological reaction to SO ₂ is similar to allergic asthma, i.e with impaired pulmonary function via increased airway resistance, impaired lung clearance, and increased susceptibility to infection	Contributes to and aggravates lung diseases like chronic bronchitis, pulmonary fibrosis via irritation leading to decreased pulmonary function and increase in stress on the heart
Sulfur Trioxide (SO ₃)	Soluble in water to form H ₂ SO ₄	Highly corrosive	Contributes to acid rain which can harm sensitive ecosystems	
Hydrogen Sulphide (H ₂ S)	Rotten egg odour at low concentration, odourless at high concentrations	Extremely toxic		
Hydrocarbons (C _x H _y)	Many different compounds	Emitted from automobile crankcase and exhaust	The primary harm of hydrocarbons is in their participation in ozone protection	Cancer is one direct primary effect of some organic compounds
Particulate Matters (SPM)			Effect varies depending on nature and size of particles. Can cause irritation, altered immune defense, or systematic toxicity	Depending on the nature and size of the particles can cause decreased pulmonary function and stress on the heart

**Gaseous Monitoring Results (28th September, 2022) /
Результаты мониторинга газов (28 сентября 2022 г.)**

Location, sample point	GPS Location	SO ₂ mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	CH ₄ % LEL	H ₂ S mg/Nm ³	VOCs mg/Nm ³	O ₂ %	NO mg/Nm ³	CO ₂ Ppm
Clinic / safety office area	6032'28.1"N 3004'36.1"E Elev: 120ft	<0.001	18.00	<0.001	<0.001	<0.001	19.86	<0.001	738
Boiler house	6032'28.7"N 3004'37.4"E Elev: 95ft	<0.001	17.50	<0.001	<0.001	<0.001	19.80	<0.001	773
Generator house	6032'29.3"N 3004'37.5"E Elev: 142ft	<0.001	22.75	<0.001	<0.001	<0.001	19.69	<0.001	789
Alum section (milling unit)	6032'30.3"N 3004'38.5"E Elev: 23ft	<0.001	19.00	<0.001	<0.001	<0.001	19.72	<0.001	822
Evaporator area	6032'30.3"N 3004'38.6"E Elev: 5ft	<0.001	49.00	<0.001	<0.001	<0.001	19.60	<0.001	824
Crushing / Bagging unit	6032'30.5"N 3004'38ss.3"E Elev: 90ft	<0.001	16.25	<0.001	<0.001	<0.001	19.68	<0.001	824
Acid plant Sulphur melting	6032'31.5"N 3004'39.7"E Elev: 14ft	22.500	27.00	<0.001	<0.001	<0.001	19.65	<0.001	826
Acid production area	6032'31.7"N 3004'40.4"E Elev: 35ft	4.500	27.25	<0.001	<0.001	<0.001	19.68	<0.001	770
Bauxite yard	6°32'28.8"N 3°04'39.2"E Elev: 133ft	<0.001	21.25	<0.001	<0.001	<0.001	19.82	<0.001	742
Old acid plant	6°32'31.1"N 3°04'42.1"E Elev: 129ft	<0.001	23.25	<0.001	<0.001	<0.001	19.84	<0.001	769
Gate house	6°32'31.0"N 3°04'34.9"E Elev: 135ft	<0.001	34.75	<0.001	<0.001	<0.001	19.92	<0.001	778
NESREA FME Limit	S.I. No. 36 of 2009	450	500		5	50	21	300	

Table 5 / Таблица 5

Meteorology and Particulate Matter Results (28th September 2022) /
Результаты метеорологии и содержания твердых частиц (28 сентября 2022 г.)

Location, sample point	GPS Location	PM2.5 mg/ Nm ³	PM10 mg/Nm ³	TPM mg/Nm ³	RH %	Temp °C	LUX	Wind Speed m/s
Clinic / safety office area	6°32'28.1"N 3°04'36.1"E Elev: 120ft	15	17	32	85.4	26.22	7900	0.5
Boiler house	6°32'28.7"N 3°04'37.4"E Elev: 95ft	16	27	43	82.0	27.60	3	0.4
Generator house	6°32'29.3"N 3°04'37.5"E Elev: 142ft	5	6	11	78.4	28.66	120	0.6
Alum section (milling unit)	6°32'30.3"N 3°04'38.5"E Elev: 23ft	50	60	110	79.4	28.28	19	0.4
Evaporator area	6°32'30.3"N 3°04'38.6"E Elev: 5ft	10	15	25	78.3	28.56	17	0.4
Crushing / Bagging unit	6°32'30.5"N 3°04'38.3"E Elev: 90ft	50	68	118	76.2	29.35	16	0.4
Acid plant Sulphur melting	6°32'31.5"N 3°04'39.7"E Elev: 14ft	30	44	74	77.0	28.83	3430	0.8
Acid production area	6°32'31.7"N 3°04'40.4"E Elev: 35ft	7	6	13	84.9	27.95	9150	0.6
Bauxite yard	6°32'28.8"N 3°04'39.2"E Elev: 133ft	3	5	8	80.4	27.39	1220	0.9
Old Acid plant	6°32'31.1"N 3°04'42.1"E Elev: 129ft	7	10	17	80.6	27.91	13100	0.6
Gate house	6°32'31.0"N 3°04'34.9"E Elev: 135ft	7	10	17	82.2	28.96	15600	0.7
NESREA Limits		50				Ambient Temp		

**Noise Level Monitoring Result (28th September 2022) /
Результаты мониторинга уровня шума (28 сентября 2022 г.)**

Location, sample point	GPS Location	Noise (dB)	NESREA (S.I. No. 35, 2009) Max. Permissible Noise Level (dB)
Clinic / safety office area	6°32'28.1"N 3°04'36.1"E Elev: 120ft	60.4	75 (Regulation 2(2), Factory/Workshop Compound)
Boiler house	6°32'28.7"N 3°04'37.4"E Elev: 95ft	87.5	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Generator house	6°32'29.3"N 3°04'37.5"E Elev: 142ft	98.7	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Alum section (milling unit)	6°32'30.3"N 3°04'38.5"E Elev: 23ft	69.0	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Evaporator area	6°32'30.3"N 3°04'38.6"E Elev: 5ft	68.4	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Crushing / Bagging unit	6°32'30.5"N 3°04'38.3"E Elev: 90ft	79.5	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Acid plant (Sulphur melting)	6°32'31.5"N 3°04'39.7"E Elev: 14ft	56.4	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Acid production area	6°32'31.7"N 3°04'40.4"E Elev: 35ft	57.8	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Bauxite yard	6°32'28.8"N 3°04'39.2"E Elev: 133ft	52.2	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Old acid plant	6°32'31.1"N 3°04'42.1"E Elev: 129ft	47.8	85 (Regulation 2(2), Factory/Workshop)
Gate house	6°32'31.0"N 3°04'34.9"E Elev: 135ft	61.9	70 (Regulation 2(1), row E)

● Monitoring the use of filter-fitted respirator at the production area to reduce personnel exposure to pollutant.

● Handling of alum sludge at the dedicated drying area should be improved upon and the evidence of past activities should be ameliorated for compliance.

● Electrically powered forklifts and other safety machineries should be incorporated and encouraged to improve compliance.

● Install transparent roofing sheets in strategic locations to save energy and enhance the illumination as appropriate.

● Training of staff on the use and handling of PPE for improved compliance.

Discussion

This report shows the variations of different environmental parameters that can influence environmental quality and human survival. The climatic characteristics of the facility area, as shown in Table 1 (Source: NiMet, 2019) and Figures 1 to 3, give the climatic variables that can have an impact on the ecological environment.

Our findings in this environmental monitoring report (Table 2 to Table 6) show the use of appropriate devices in determining necessary environmental variables important to protect the ecological environment. This corroborates the report of previous

scientists such as Zhan et al. (2021) [15], who show the possibility of using optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables, which had a diversified application of deep aquatic resources. Previous investigations by Monteiro et al. (2018) [16], Fernandez et al. (2020) [17], and Bogris et al. (2022) [18] supported this application.

Conclusion

In general, the air quality, noise level, dust emission, illumination, heat stress, and effluent results in the factory were considered satisfactory in most respects based on the assessment results and specifications.

Management of the facility should intensify efforts on the implementation of the above recommendations for improved compliance. The data obtained in this regard can also be a good guide for other related industrial settlements. This will help to recover and protect valuable resources in the complex environment.

Considering the available literature on industrial monitoring, there is little or no work done in this aspect of the research. Hence, we have decided to publish this data in the Journal "Mine Surveying and Subsoil Use" because most of the studies done by other authors are not published, especially in the Sub-Saharan Africa Region.

REFERENCES

1. Kumar A, Kim H, Hancke GP. Environmental Monitoring Systems: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(4):1329–39. DOI:10.1109/jsen.2012.2233469.
2. Shamsadini K, Askari Shahamabad M, Askari Shahamabad F. Analysis of factors affecting environmental audit (EA) implementation with DEMATEL method. *Social Responsibility Journal*. 2023;19(5):777–96. DOI:10.1108/SRJ-03-20210097.
3. Conde MDC, Sanchez JS. The school curriculum and environmental education: A school environmental audit experience. *International Journal of Environmental & Science Education*. 2010;5(4):477–94.
4. Erlygina E. Environmental Audit. *Bulletin of Science and Practice*. 2022;8(11):423–27. (In Russ.). DOI: 10.33619/2414-2948/84/53.
5. Gowri S, Harikrishnan V. Green computing: Analyzing power consumption using local cooling. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2014;15(3):105–07.
6. Hichri A. Integrated reporting, audit quality: presence of environmental auditing in an international context. *European Business Review*. 2023;35(3):397–425. DOI: 10.1108/EBR-03-2022-0044.
7. Rakova B, Dobbe R. Algorithms as Social-Ecological-Technological Systems: an Environmental Justice Lens on Algorithmic Audits. *Proceedings of FAccT '23: 2023 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. 2023. DOI:10.48550/arXiv.2305.05733.
8. Fauziah F. Internal Audit Procedure on Environmental Management to Minimize Impact of Environmental Damage (Case Study at PT. Wonojati Wijoyo Kediri). *Journal of economics, finance and management studies*. 2023;06(06):2629–33. DOI: 10.47191/jefms/v6-i6-23.
9. Shamsadini K, Shahamabad MA, Bahonar S. Environmental Audit. *Bulletin of Science and Practice*. 2022:423–427.
10. Yekimov S, Prodius O, Chelombitko T, et al. Reengineering of agricultural production based on digital technologies. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2022;981:032005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032005>.
11. Dunkerley D. Acoustic methods in geophysics. *Preview*. 2022;218:42–7. DOI: 10.1080/14432471.2022.2087935.
12. Chue H, Hartfield JV, Wareham PD, Payne PA. A Data Acquisition System for A Hand-Held Electronic Nose (H2EN). In: Obermeier, E. (eds) *Transducers '01 Eurosensors XV*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2001:1684–87. https://doi.org/10.1007/978-3-642-59497-7_398.
13. Allil RCSB, Lima LAC, Allil AS, Werneck MM. FBG-Based Inclinometer for Landslide Monitoring in Tailings Dams. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(15):16670–80. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3081025.
14. Wang W, Xue X, Chen W, Xue X. Study on the characteristic mechanisms of infrasonic precursors during the damage process of impending earthquake sources. *PLoS ONE*. 2021;16(10):e0257345. DOI: 10.1371/journal.pone.0257345.
15. Zhan Z, Cantono M, Kamalov V, et al. Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables. *Science*. 2021;371(6532):931–36. DOI: 10.1126/science.abe6648.
16. Monteiro CS, Coelho L, Barbosa SM, Guimarães D. (2018). Development of a New System for Real-Time Detection of Radon Using Scintillating Optical Fibers. *Proceedings of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors*; Lausanne, Switzerland. 24–28 September p. WD5.
17. Fernandez-Ruiz MR, Soto MA, Williams EF, et al. Distributed acoustic sensing for seismic activity monitoring. *APL Photonics*. 2020;5:030901. DOI: 10.1063/1.5139602.
18. Bogris A, Nikas T, Simos C, et al. Sensitive seismic sensors based on microwave frequency fiber interferometers in commercially deployed cables. *Scientific Reports*. 2022;12:14000. DOI: 10.1038/s41598-022-18130-x.

ABOUT THE AUTHORS

Ameen Babatunde A. -

Dr. Scientific Degree, Lead Consultant and Researcher, Roygbiv Analytical and Environmental Service Nigeria Limited, Suite No. 5, Abdulsalam Shopping Complex off Hajji Camp Road, Ilorin, Kwara State, Nigeria, ORCID ID: 0000-0002-3079-9349, e-mail: ameenroygbiv@gmail.com

Ajayi Adedayo O. -

Professor, Adekunle Ajasin University, Department of Microbiology; Centre for Infectious Disease Control and Drug Development (CIDCDD) AAUA, Akungba-Akoko, Ondo State, Nigeria

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдурахман Бабатунде Амин -

доктор наук, ведущий консультант и исследователь, Roygbiv Analytical and Environmental Service Nigeria Limited, офис № 5 Abdulsalam, Хаджи Кэмп Роуд, г. Илорин, штат Квара, Нигерия, ORCID ID: 0000-0002-3079-9349, e-mail: ameenroygbiv@gmail.com

Аджайи Адедайо Оладжиде -

профессор, Университет Адекунле Аджасин, факультет микробиологии; Центр по контролю инфекционных заболеваний и разработке лекарственных средств (CIDCDD) AAUA, г. Акунгба-Акоко, штат Ондо, Нигерия

Contribution / Критерии авторства:

The authors contributed equally to this article. Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Conflict of interest / Конфликт интересов:

The authors declare no conflict of interest. / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ТРУДНОДОСТУПНЫХ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Р. Е. Левитин, С. Е. Аксенов, Н. С. Ульянкин, А. П. Терешонок
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия

Аннотация: Рассмотрена возможность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для геодезического мониторинга деформаций трубопроводов в труднодоступных арктических районах. Трубопроводы являются одними из наиболее важных элементов нефтегазовой инфраструктуры, и их техническое состояние напрямую влияет на безопасность и эффективность углеводородного транспорта. Рассмотрена возможность применения метода геодезического мониторинга деформаций надземных трубопроводов, использующего систему лазерного сканирования и беспилотные летательные аппараты в условиях Крайнего Севера. Проведено сравнение метода мониторинга надземных трубопроводов геометрическим нивелированием и метода лазерного сканирования с применением БПЛА.

Ключевые слова: мониторинг, деформация, трубопровод, лазерное сканирование, беспилотные летательные аппараты

Для цитирования: Левитин Р. Е., Аксенов С. Е., Ульянкин Н. С., Терешонок А. П. Геодезический мониторинг деформаций надземных трубопроводов при использовании беспилотных летательных аппаратов в труднодоступных арктических районах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 114–119. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_114_119.

GEODETIC MONITORING OF DEFORMATIONS OF ABOVE GROUND PIPELINES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES IN DIFFICULTLY ACCESSIBLE ARCTIC AREAS

R. E. Levitin, S. E. Aksenov, N. S. Ulyankin, A. P. Tereshonok
Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

Abstract: The article considers the possibility of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for geodetic monitoring of pipeline deformations in remote Arctic areas. Pipelines are one of the most important elements of the oil and gas infrastructure and their technical condition directly affects the safety and efficiency of hydrocarbon transport. A comparison of the method of monitoring overhead pipelines by geometric leveling and the method of laser scanning using is carried out. The possibility of using the method of geodetic monitoring of deformations of underground pipelines using laser scanning systems and unmanned aerial vehicles in the conditions of the far north is considered.

Keywords: monitoring, deformation, pipeline, laser scanning, unmanned aerial vehicles

For citation: Levitin R. E., Aksenov S. E., Ulyankin N. S., Tereshonok A. P. Geodetic monitoring of deformations of above ground pipelines using unmanned aerial vehicles in difficultly accessible arctic areas. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):114–119. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_114_119.

Введение

В настоящее время в условиях арктического климата существует сложность проведения геодезического мониторинга деформаций трубопроводов классическими методами (геометрическое нивелирование), попадающих под нормативы точности по ГОСТу 24846-2012 [1–5].

В данной статье рассматривается возможность применения метода геодезического мониторинга деформаций надземных трубопроводов, использующего системы лазерного сканирования (ЛИДАР) и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в условиях Крайнего Севера.

Этот вопрос актуален, так как в последние годы наблюдается тенденция ввода в эксплуатацию нефтяных и газо-

вых месторождений в северных частях Ямало-Ненецкого автономного округа и Красноярского края.

В 1980-е годы были обнаружены Мессояхские месторождения (Восточно-Мессояхское и Западно-Мессояхское), однако из-за отсутствия технологий и транспортно-промышленной автономии местности разработка залежей нефти притормозилась. Благодаря программе комплексного освоения месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа и севера Красноярского края, проводимой Минэнерго России, проекту «Мессояхи» дан новый импульс. Недавно разработана концепция развития Восточно-Мессояхского месторождения, а также спроектированы ключевые объекты инфраструктуры. В связи с необходимостью введения новых объемов добычи нефти и газа значимость разработки подобных месторождений существенно возрастает.

Программа инновационного развития ПАО «Транснефть» на период 2022–2026 годов предполагает:

- проведение высокоточного лазерного сканирования;
- разработку алгоритмов расчета морозного пучения грунтов;
- проведение геологических обследований и сейсмического микрорайонирования площадок магистральных задвижек;
- разработку импортозамещающего оборудования и ПО.

Так как в России идет освоение арктических зон, которое сопровождается строительством новых капитальных объектов, вдобавок к этому мониторинг производится на уже эксплуатируемых сооружениях, можно объективно говорить об актуальности проведения геодезического мониторинга на объектах нефтегазовой промышленности, в частности трубопроводов [10–12].

Цель работы: отразить повышение эффективности проведения работ по геодезическому мониторингу трубопроводов в арктических районах.

Материал и методы исследований

На основании требуемой точности по ГОСТ 24846-2012 наиболее подходящий метод определения деформации — это геометрическое нивелирование. Но есть объективная специфика выполнения работ на линейных объектах Крайнего Севера. Использование цифровых и оптических приборов при сильном ветре, высокой влажности, плохой видимости, метелях и высокой солнечной активности запрещено. Так как данные работы выполняются сравнительно долго, то такие условия могут привести к длительным простоям.

Например, для установки штатива на заболоченных моховых участках арктической тундры металлические костыли забиваются в мерзлоту на глубину от 10 до 30 см, а после проведения измерений их необходимо извлечь для дальнейшего использования.

Также при геометрическом нивелировании линейных трубопроводов существует весомое значение накапливаемой ошибки (прямо пропорционально длине измеряемого линейного объекта). Расстояние между исходными узловыми точками, имеющими известные значения планово-высотного положения в заданной системе координат, в условиях арктического климата в нивелирном ходе сравнительно больше, нежели в южных широтах, следовательно, и накапливаемая ошибка кратно возрастает [14, 15].

На рисунке 1 изображена схема мониторинга деформации трубопровода методом геометрического нивелирования из середины. Красными окружностями обозначены пункты

с известной высотой, зелеными — узловые точки нивелирного хода, на которые ставится нивелирная рейка.



Рис. 1. Мониторинг трубопровода методом геометрического нивелирования
Fig. 1. Pipeline monitoring using geometric leveling method

На рейку наводятся сеткой нити нивелира и берется отсчет на заднюю и переднюю рейки, результат высчитывают по формуле

$$h = a - b, \quad (1)$$

где h — превышение;

a — отсчет по задней рейке;

b — отсчет по передней рейке.

А затем, зная высоту задней точки в нужной системе координат, можем вычислить высоту передней точки (в конечном счете — высоту деформационной марки) по формуле

$$H_B = H_A + h, \quad (2)$$

где H_B — высота передней точки;

H_A — высота задней точки.

В настоящее время в геодезии и картографии применяются беспилотные летательные аппараты с системой лазерного сканирования.

ЛИДАР представляет собой сенсор, который использует лазерный луч для обнаружения и измерения расстояния до объектов в пространстве. Этот инструмент используется для создания детальных и точных трехмерных моделей поверхностей, что находит применение в таких областях, как геодезия, метеорология, а также в разработке систем управления для беспилотных транспортных средств [17–20].

Основная идея лазерного сканирования заключается в измерении времени, необходимого для того, чтобы лазерный луч прошел путь до цели и вернулся обратно к приемнику. Расстояние вычисляется путем умножения скорости света на время. ЛИДАР может генерировать до миллиона импульсов в секунду, используя разнообразные типы лазеров. Полученные данные преобразуются в трехмерную визуализацию, называемую облаком точек, которое представляет собой детальное изображение объектов в окружающей среде.

При изучении максимально допустимых значений и точности определения высотного положения деформационных марок фундаментных конструкций на болотистой тундре возникает вопрос о целесообразности достижения точности измерений в 2 миллиметра (согласно ГОСТ 24846-2012) для обнаружения деформаций, превышающих 100 миллиметров. Неравномерность сезонного пучения вызывает формирование плоских и плоско-выпуклых бугров высотой в среднем 0,3–1,0 м и диаметром 0,5–3,0 м, сложенных льдистыми суглинками, супесями, торфом [6, 13].

ГОСТ 24846-2012 требует доработки с учетом условий значительных деформаций и прогресса в научно-технической сфере геодезии и маркшейдерии, развития систем ГНСС, значительного скачка в области беспилотных летательных аппаратов и их совмещения.

Результаты исследований

Допуская увеличение погрешности в 10 раз, использование метода лазерного сканирования с применением БПЛА не только сокращает расходы по сравнению с традиционными геодезическими методами, но и способствует повышению эффективности. Имея дополнительную информацию о самом трубопроводе в виде облака точек (рис. 2), фото и видео материалов, можно провести глубокий анализ состояния трубопровода и принять в соответствии с этой информацией правильные решения. Тогда как при традиционных способах есть вариант повторного выезда бригады в поле в случае возникновения ошибок или нестыковок, что повлечет за собой дополнительные временные и финансовые издержки.

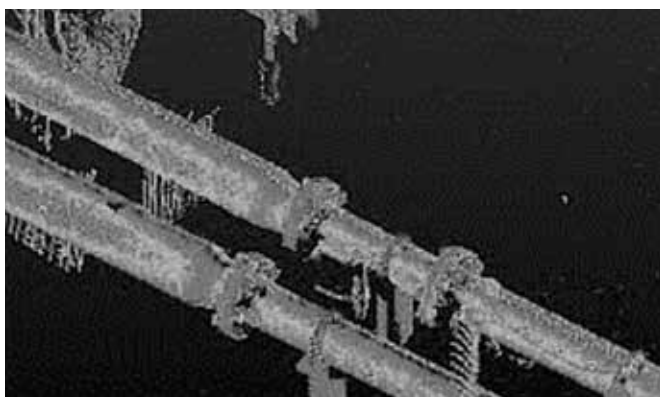


Рис. 2. Облако точек нефтепровода
Fig. 2. Oil pipeline point cloud

Предлагаемый принцип работы с БПЛА:

1. Работы будут проводиться в относительном режиме измерений — РРК, который предполагает использование помимо приемника, который находится на борту БПЛА, называемого ровером, еще одного приемника, стоящего и записывающего спутниковые измерения на точке с известными координатами (репере или ГГС) с одинаковой частотой (не длительнее одной секунды), называемого базой.

2. В план полета БПЛА задаются параметры полета (высота, траектория) в зависимости от требуемой плотности облака точек.

3. Производится запуск БПЛА с точки начала полета. Аппарат летит с заданными ему параметрами вдоль обследуемой трассы и записывает траекторию своего движения и метки, в которых он делает лазерное сканирование сенсором LIDAR.

4. В зависимости от запросов БПЛА может пролетать в двух направлениях: вдоль трубопровода для создания трехмерной модели или лететь в одном направлении (рис. 3), где оператор будет ожидать его в конце заданного маршрута полета. Параллельно сканированию БПЛА способен делать аэрофотосъемку, на основании которой можно получить информацию о разливах нефти, состоянии трубопровода на разных участках, попытках кражи нефти, различных подкопах, рвах и т. д.

5. После посадки оператор скачивает полученную информацию из памяти БПЛА: измерения LIDAR, файлы спутни-

ковых измерений, фотографии и др. Также необходимо скачать файлы статических измерений с базового приемника, который ставили на точке с известными координатами. Впоследствии оператор может синхронизировать траекторию полета, на которой обозначены метки, записанные в момент сканирования, фотографирования и данные спутниковых измерений с беспилотника и базы. Во время обработки становятся доступными координаты всех меток в виде достаточно плотного облака точек в заданной системе координат. На основании данных материалов получаем огромное количество избыточной информации как в разрезе геодезического мониторинга, так и в разрезе мониторинга трубопровода.

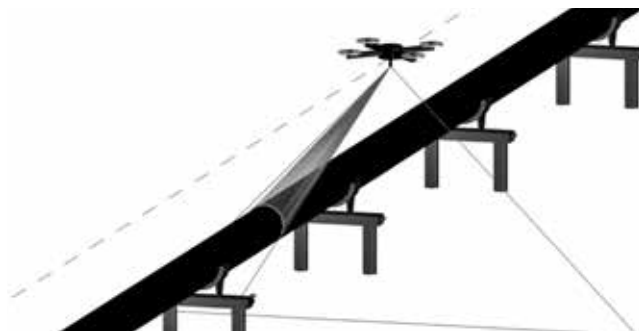


Рис. 3. Мониторинг трубопровода с применением беспилотного летательного аппарата
Fig. 3. Pipeline monitoring using UAVs

6. Если необходимо упростить задачу геодезического мониторинга до получения информации для сравнительной статистики по временным промежуткам, существует возможность с помощью полученного облака точек снять нужные отметки и раз в заданный промежуток времени сравнивать их отклонение от прошлого значения, например углы опор трубопровода (рис. 3). Существует также вариант сравнения отклонений целых моделей трубопроводов.

7. Если где-то была обнаружена деформация, которая не удовлетворяет требованиям, необходимо локально провести измерения координат деформационных марок традиционными методами, что будет в разы менее затратным, чем проводить измерения всей длины трубопровода. Также на каждой узловой точке необходимо устройство основания для устойчивого положения штатива, большое количество дополнительных данных для мониторинга самого трубопровода и рядом лежащих к нему объектов или почвы.

Схема деформированного трубопровода приведена на рисунке 4.

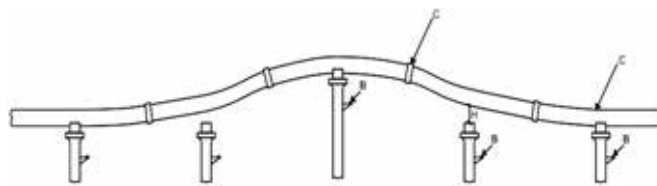


Рис. 4. Схема деформированного трубопровода: В — деформационные марки; С — характерные точки изгиба трубопровода; Н — высота
Fig. 4. Diagram of a deformed pipeline: В — deformation marks; С — characteristic bending points of the pipeline; Н — height

Недостаток получения данных способом геометрического нивелирования заключается в том, что отметку можно получить только в точке В. Но бывают ситуации, когда грунт выпучивается и поднимает одну опору, соседние же опоры

остаются на месте, в результате чего трубопровод висит над ростверками (высота Н). В этом случае нагрузка не распределяется на соседние опоры и возникает опасная ситуация несмотря на то, что они находятся в допусках.

Использование системы с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при такой опасной ситуации позволяет получить облако точек трубопровода, исходя из которого появляется возможность увидеть характерные точки изгиба (точки С) и в соответствии с этими данными принять правильное решение.

Преимущества методов с использованием беспилотных летательных аппаратов по сравнению с традиционными методами:

- возможность более частого проведения мониторинга;
- меньшие финансовые затраты;
- более быстрое получение выходных данных;
- предотвращение различных диверсий;
- экологичность (транспортировка оборудования и бригады, работающей традиционными методами, будет наносить ущерб почвенно-растительному слою и загрязнять атмосферу).

Используя аппроксимационно-математическую обработку координат точек, возможно получить объемную модель, погрешность которой будет меньше, чем погрешность отдельно взятой измеренной точки в целом. Теория, по которой строится модель, основывается на знании о том, что трубопровод является цельной и единой конструкцией, соответственно, можно отсеять скачки координат, выходящие за пределы двух сигм нормального распределения [7–9].

На рисунке 5 представлен продольный разрез трубопровода, серым цветом обозначена погрешность облака точек, черным пунктиром — линия положения трубопровода с доверительной вероятностью 95 %, основанная на средней квадратической погрешности отклонения координат точек облака. Черная линия соответствует реальному положению нижней части трубопровода.

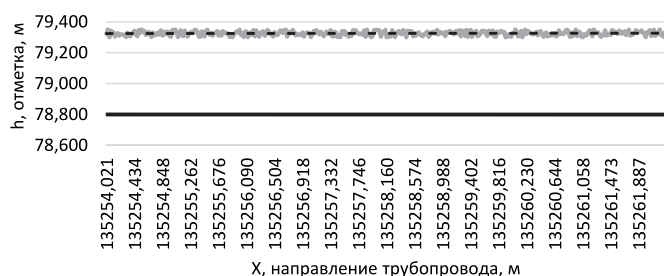


Рис. 5. График зависимости направления трубопровода от высотной отметки

Fig. 5. Graph of the dependence of the pipeline direction on the elevation

На рисунке 6 схематично изображен поперечный разрез трубопровода. Черным цветом представлены проекции измеренных точек на плоскость поперечного разреза за определенный интервал, длина которого зависит от искривления трубопровода на данном участке. Красным цветом изображен разрез вычисленной аппроксимированной математической модели. Стоит подметить, что разброс облака точек намеренно искажен для наглядности.

Усредненные значения технических характеристик БПЛА:

- продолжительность полета — до 60 минут;
- точность определения координат точек — от 3 до 5 сантиметров;

- рабочая температура — до минус 30 градусов Цельсия;
- максимально допустимая скорость ветра — до 18 метров в секунду;
- крейсерская скорость — до 55 километров в час.



Рис. 6. Поперечный разрез трубопровода, представленный облаком точек
Fig. 6. Cross-section of a pipeline represented by a point cloud

Но помимо преимуществ, существует ряд рисков, которые могут помешать процессу измерений деформаций трубопроводов:

- использование БПЛА может создавать помехи для работы радиооборудования, что приведет к погрешностям в полученной информации;
- риск столкновения с препятствиями или авария, что может нанести ущерб окружающей среде или людям;
- возникновение технических проблем, связанных с аккумулятором или программным обеспечением, может повлиять на качество мониторинга;
- некорректное произведение измерения, например, при сильном ветре или снежной погоде.

Для снижения вероятности проявления данных рисков предлагается проведение следующих мероприятий:

- обучение персонала по работе с БПЛА и правилам безопасности;
- использование системы автоматического управления полетом, чтобы снизить вероятность аварий;
- регулярное проведение технического обслуживания БПЛА и обновление программного обеспечения;
- минимизация использования БПЛА в районах с высокой плотностью препятствий или в условиях сильного ветра.

Заключение

По результатам анализа существующих решений геодезического мониторинга надземных трубопроводов в тундровой зоне выявлены недостатки классических методов:

- для установки штатива в неподвижное положение в мерзлый грунт необходимо вбивать металлические колышки;
- выполнение работы цифровыми и оптическими приборами в сложных погодных условиях (в том числе ночью) запрещено, так как данные работы выполняются сравнительно долго, то такие условия могут привести к длительным простоям.

Также рассмотрена возможность применения беспилотных летательных аппаратов с системами лазерного сканирования (ЛИДАР) в условиях Арктики и выявлен ряд преимуществ:

- минимальное количество людей в одной бригаде (2–3 человека);
- высокая скорость выполнения полевых работ;

— низкое значение человеческого фактора при выполнении работ за счет автономного режима работы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Результаты исследований могут быть полезными при проведении мероприятий по геотехническому мониторингу надземных трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Елизаров АС, Курчатова АН. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2020;25(1):28–42. [Elizarov AS, Kurchatov AN. Monitoring of aboveground pipelines using global navigation satellite systems. *Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2020;25(1):28-42 (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-28-42.
2. Биндер ИО, Мурзинцев ПП. Об учете погрешностей геодезического обеспечения при строительстве, мониторинге и предрасчетах деформаций трубопроводов. *Геодезия и картография*. 2015;(6):13–16. [Binder IO, Murzintsev PP. On accounting for errors in geodetic support during construction, monitoring and pre-calculations of pipeline deformations. *Geodesy and cartography*. 2015;(6):13-6 (In Russ.)].
3. Ахмедов БН. Точность определения координат при геодезическом мониторинге. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021;4(114):40–44. [Akhmedov BN. Accuracy of determining coordinates during geodetic monitoring. *Surveying and subsoil use*. 2021;4(114):40-4 (In Russ.)].
4. Ермилов АЛ, Гречанов АВ, Щекочихин СА. Мониторинг деформации трубопровода и подвижек грунта на объекте магистральный газопровод «Сахалин – Хабаровск – Владивосток». *Фотон-экспресс*. 2015;5(125):14–17. [Ermirov AL, Grechanov AV, Shchekochikhin SA. Monitoring of pipeline deformation and soil movements at the Sakhalin-Khabarovsk-Vladivostok main gas pipeline facility. *Photon-express*. 2015;5(125):14-7 (In Russ.)].
5. ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2013. 20 с. [GOST 24846-2012. Soils. Methods of measuring deformations of foundations of buildings and structures. Moscow, 2013 (In Russ.)].
6. Патент № 2712796 С1 Российская Федерация, МПК G01C 5/00, G01V 3/12, G01K 13/00. Способ определения величины и направления деформации, наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты: № 2019113686; заявл. 30.04.2019; опубл. 31.01.2020. П. П. Мурзинцев, И. О. Биндер, А. С. Репин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий». [Patent No. 2712796 C1 Russian Federation, IPC G01C 5/00, G01V 3/12, G01K 13/00. Method for determining the magnitude and direction of deformation, the outer component of the permafrost heaving mounds: No. 2019113686: application 30.04.2019: publ. 31.01.2020 / P. P. Murzintsev, I. O. Binder, A. S. Repin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Geosystems and Technologies" (In Russ.)].
7. Мурзинцев ПП, Гринь ГА. Геодезический мониторинг подводных переходов магистральных газопроводов. *Гео-Сибирь*. 2006;1(1):133–136. [Murzintsev PP, Grin GA. Geodesic monitoring of underwater crossings of main gas pipelines. *Geo-Siberia*. 2006;1(1):133-6 (In Russ.)].
8. Исламов РР. Совершенствование системы мониторинга технического состояния протяженных участков магистральных нефтегазопроводов применением волоконно-оптических сенсоров деформации: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2018. 168 с. [Islamov RR. Improvement of the system for monitoring the technical condition of extended sections of main oil and gas pipelines using fiber-optic strain sensors: specialty 25.00.19 "Construction and operation of oil and gas pipelines, bases and storages": dissertation for the degree of candidate of Technical Sciences. Ukhta, 2018 (In Russ.)].
9. Мурзаханов ГХ, Шугорев ВН. Методы оценки конструкционной прочности трубопроводов: учебное пособие по курсам «Конструкционная прочность», «Динамика и прочность машин» для студентов, обучающихся по направлениям «прикладная механика» и «энергомашиностроение»; под ред. В. П. Чиркова; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Московский энергетический ин-т (технический ун-т) (МЭИ). М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 70 с. [Murzakhanov GN, Shchugorev VN. Methods for assessing the structural strength of pipelines: a textbook on the courses «Structural strength», «Dynamics and strength of machines» for students studying in the fields of «Applied Mechanics» and «Power engineering». Edited by V. P. Chirkov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, Moscow Power Engineering Institute (Technical University) (MEI). Moscow: Publishing House of MEI, 2009 (In Russ.)].
10. Уваров АИ, Пронина ЛА. Исследование технологий геодезического мониторинга деформаций дна в зоне расположения подводных переходов магистральных трубопроводов. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2020;25(3):107–116. [Uvarov AI, Pronina LA. Investigation of technologies for geodetic monitoring of bottom deformations in the area of underwater crossings of main pipelines. *Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2020;25(3):107-16. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-107-116.
11. Рылько НМ. Анализ современных методов мониторинга магистральных трубопроводов. *Молодой ученый*. 2022; 51(446):59–60. [Rylko NM. Analysis of modern methods of monitoring main pipelines. *Young scientist*. 2022;51(446):59-60 (In Russ.)].
12. Шац ММ, Нерадовский ЛГ. Проблемы контроля состояния и надежности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» на стадии эксплуатации. *Маркшейдерия и недропользование*. 2020;4(108):3–11. [Schatz MM, Neradovsky LG. Problems of monitoring the condition and reliability of the Eastern Siberia - Pacific Ocean oil pipeline at the stage of operation. *Surveying and subsoil use*. 2020;4(108):3-11 (In Russ.)].
13. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. М.: Стандартинформ, 2013. 132 с. [SP 25.13330.2012. Foundations and foundations on permafrost soils. Updated version of the SNiP 2.02.04-88. Moscow, 2013 (In Russ.)].

14. Streletskiy DA, Shiklomanov NI, Hatleberg E. Infrastructure and a Changing Climate in the Russian Arctic: A Geographic Impact Assessment. *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*. 2012;(1):407-12.
15. Шац ММ, Соловьев ВС. Дистанционный мониторинг геоэкологической обстановки Севера. Учебное пособие. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2002. 63 с. [Shats MM, Solovyov VS. Remote monitoring of the geoeological situation in the North. Study guide. Yakutsk: Publishing House of the Institute of Permafrost Studies SB RAS, 2002].
16. ГОСТ 25358-2012. Грунты. Методы полевого определения температуры. М.: Стандартинформ, 2013. 12 с. [GOST 25358-2012. Soils. Methods of field temperature determination. Moscow, 2013 (In Russ.)].
17. Антонович КМ. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: Т. 1. М.: Картеоцентр, 2005. 334 с. [Antonovich KM. The use of satellite radio navigation systems in geodesy. Moscow, 2005 (In Russ.)].
18. Кравчук ИМ. Особенности вычисления нормальных высот по результатам спутниковых измерений. *Геодезия и аэрофотосъемка*. 2010;(4):35-40. [Kravchuk IM. Features of calculating normal heights based on the results of satellite measurements. *Geodesy and aerial photography*. 2010;(4):35-40 (In Russ.)].
19. Генике АА, Побединский ГГ. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. М.: Картеоцентр, 2004. 355 с. [Genike AA, Pobedinsky GG. Global satellite positioning systems and their application in geodesy. Moscow, 2004 (In Russ.)].
20. ГКИНП-01-271-03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037141> (дата обращения: 27.09.2024). [GKINP-01-271-03. Guidelines for the creation and reconstruction of urban geodetic networks using GLONASS and GPS satellite systems. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200037141> (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Роман Евгеньевич Левитин –

канд. техн. наук, доцент, Центр проектного обучения, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-6883-4613>, Scopus Author ID: 57189071614, e-mail: 746636@mail.ru

Станислав Евгеньевич Аксенов –

студент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия, e-mail: aksenovse03@gmail.com

Никита Станиславович Ульянкин –

студент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия, e-mail: nulyankin22@gmail.com

Антон Павлович Терешонок –

студент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия, e-mail: antontereshonok1975@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

ABOUT THE AUTHORS

Roman E. Levitin –

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Project Training Center, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-6883-4613>, Scopus Author ID: 57189071614, e-mail: 746636@mail.ru

Stanislav E. Aksenov –

student, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation, e-mail: aksenovse03@gmail.com

Nikita S. Ulyankin –

student, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation, e-mail: nulyankin22@gmail.com

Anton P. Tereshonok –

student, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation, e-mail: antontereshonok1975@mail.ru

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ КАРЬЕРА КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ

С. Ю. Новоженин¹, Е. А. Волошина¹, А. В. Маркус²

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

²АО «Полюс Алдан», респ. Саха (Якутия), п. Нижний Куранах, Россия

Аннотация: В статье рассмотрен актуальный вопрос прогноза сдвижений и деформаций карьера сложной формы, характеризующейся криволинейностью бортов в плане. В ходе исследования было проведено численное моделирование в программном комплексе «Plaxis 3D» на основе численного метода конечных элементов. Для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород была построена однородная модель, для которой физико-механические и деформационные свойства были заданы согласно результатам инженерно-геологических изысканий. Расчет сдвижений и деформаций в массиве производился на основе использования модели поведения материала с упрочнением грунта (hardening soil). Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния массива, сформированного в результате ведения горных работ, произведена качественная и количественная оценка величин напряжений, определена локализация и прогнозные величины сдвижений и деформаций в бортах карьера. На основании полученных прогнозных значений деформаций сделан вывод о расположении наиболее опасных участков с точки зрения проявления деформационных процессов и дальнейшего возможного нарушения устойчивости бортов карьера. Установлено, что выявленные участки не вполне совпадают с зонами, на которых проводятся натурные мониторинговые наблюдения. Сформулированы рекомендации по улучшению проекта мониторинга путем организации дополнительных натурных наблюдений в выявленных опасных зонах.

Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, прогнозная оценка, напряженно-деформированное состояние, напряжение, деформация, сдвижение, метод конечных элементов, моделирование, мониторинг

Для цитирования: Новоженин С. Ю., Волошина Е. А., Маркус А. В. Прогнозная оценка сдвижений и деформаций карьера криволинейной формы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 120-129. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_120_129.

PREDICTIVE ASSESSMENT OF DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS OF A CURVILINEAR QUARRY

S. Yu. Novozhenin¹, E. A. Voloshina¹, A. V. Markus²

¹Saint Petersburg mining university, Saint Petersburg, Russian Federation

²Polyus Aldan JSC, Rep. Sakha (Yakutia), Nizhny Kuranakh settlement, Russian Federation

Abstract: The article considers the issue of forecasting displacements and deformations of a quarry of complex shape, characterized by curvilinear sides in plan. In the course of the study, numerical modeling was carried out in the Plaxis 3D software package based on the numerical finite element method. To simulate the stress-strain state of a rock mass, a homogeneous model was built, for which the physical-mechanical and deformation properties are set according to the results of engineering and geological surveys. The calculation of displacements and deformations in the massif was carried out based on the use of a material behavior model with hardening soil. The analysis of the stress-strain state of the massif formed as a result of mining operations was carried out, a qualitative and quantitative assessment of the stress values was made, the localization and predicted values of displacements and deformations in the sides of the open pit were determined. Based on the obtained predictive values of deformations, a conclusion was made about the location of the most dangerous areas in terms of the manifestation of deformation processes and a further possible violation of the stability of the sides of the open pit. Based on the obtained predictive values of deformations, a conclusion was made about the location of the most dangerous areas in terms of the manifestation of deformation processes and a further possible violation of the stability of the sides of the open pit. It has been established that the identified areas do not quite coincide with the areas where field monitoring observations are carried out. Recommendations are formulated to improve the monitoring project by organizing additional field observations in the identified hazardous zones.

Keywords: open pit mining, quarry, predictive assessment, stress-strain state, stress, strain, displacement, finite element method, simulation, monitoring

For citation: Novozhenin S. Yu., Voloshina E. A., Markus A. V. Predictive assessment of displacements and deformations of a curvilinear quarry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):120-129. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_120_129.

Введение

Необходимость повышения эффективности и безопасности открытых горных работ на современном этапе развития горной науки не вызывает сомнений. Достижение указанных целей возможно различными способами. Например, путем применения новых технологий добычи [1-3], внедрением новых методов маркшейдерского обеспечения открытых горных работ [4-6], основанных, в том числе, на применении дистанционных методов съемок [7-9].

Всё большее распространение находят методы дистанционного зондирования Земли с применением мультиспектральных съемок для решения различных инженерных, в том числе маркшейдерских задач [10]. Также решению задач повышения эффективности добычи и безопасности ведения горных работ способствует качественный прогноз геомеханических процессов, происходящих в массиве [11-13].

Применение традиционных способов расчёта устойчивости [14-16] предполагает однородность геологического строения участка и топографическую однородность в направлении простирания, поэтому предпочтение при исследовании вопроса оценки устойчивости отдавалось численным методам.

Цель исследований: прогноз сдвижений и деформаций карьера сложной формы, характеризующейся криволинейностью бортов в плане.

Объект исследований

Золотоносное месторождение, разрабатываемое карьером с глубиной, изменяющейся в пределах от 20 до 70 м со сложной конфигурацией бортов.

Карьер имеет сложную в плане конфигурацию, поэтому в качестве основной задачи ставится оценка напряженного состояния массива в местах поворотов и изгибов. Рассматриваемое золотоносное месторождение разрабатывается карьером с глубиной, изменяющейся в пределах от 20 до 70 м. Из-за сложности геологического строения месторождения геометрия карьера имеет неправильную форму, так как рудные тела находятся разрозненно. Это приводит к тому, что единая чаша карьера отсутствует, а выемка ведется поуступно у каждого из рудных тел.

Конфигурация карьера неправильной формы в виде триангуляционной модели представлена на рис. 1.

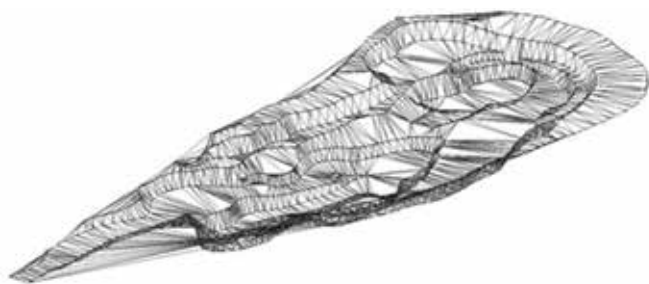


Рис. 1. Конфигурация карьера [составлено авторами]
Fig. 1. Open pit mine configuration [compiled by the authors]

Особенности сложной геометрии карьера приводят к тому, что в местах перегибов и резких поворотов происходит концентрация напряжений в массиве, что в конечном итоге может привести к нарушению устойчивости бортов карьера.

Методы исследования

Основные понятия

Современные численные методы, реализованные в современных программных комплексах математического моделирования [17-19], позволяют решить задачу прогноза сдвижений и деформаций в трехмерной постановке (что особенно актуально в случае сложной пространственной геометрии уступов карьера), а также позволяют в случае необходимости учесть неоднородность массива пород, трещиноватость, гидрогеологические условия. В данном исследовании для оценки устойчивости бортов карьера используется программный комплекс Plaxis 3D, хорошо зарекомендовавший себя для геотехнических расчетов [20-22].

Влияние различных факторов на устойчивость бортов и уступов карьеров рассматривалась во многих работах зарубежных и отечественных авторов [23-25]. Большой вклад в развитие горной геомеханики внесли такие отечественные ученые, как: Мельников Н.В., Ржевский В.В., Трубецкой К.Н., Фисенко Г.Л., Шпаков П.С., Попов В.Н., Гальперин А.М., а также многие зарубежные исследователи [26-28].

Несмотря на большое количество исследований, проблема обеспечения устойчивости бортов карьера актуальна по сей день. Причина невозможности определения единого стандартного подхода к решению этого вопроса заключается во влиянии многих факторов, которые определяют индивидуальные особенности каждого месторождения. К таким факторам относят горно-геологические и гидрогеологические условия, изменение физико-механических свойств в пределах карьера, влияния взрывов и землетрясений, напряженно-деформированное состояние пород и т.д.

На данный момент существуют различные методы объемного моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, но следует отметить, что применительно к открытым горным работам в отечественной практике проведен сравнительно небольшой объём исследований. В качестве примера можно привести работу по оценке НДС массива пород Съединой С.С. [29]. Также следует указать работы Мустафина М.Г. и др., в которых приводится классификация карьеров по сложности формы и определяются закономерности проявления процесса сдвижения по результатам математического моделирования [30-31].

Широкого практического применения объемные методы оценки, учитывающие трехмерные эффекты в условиях сложной геометрии бортов, на данный момент не нашли. Поэтому задачами настоящего исследования были сформулированы: построение модели карьера с характерной криволинейной в плане формой бортов, полученной по результатам маркшейдерской съемки; анализ НДС массива и прогнозная оценка сдвижений и деформации в массиве; определение степени вредного влияния процесса сдвижения на земную поверхность.

Необходимые для исследования расчеты напряженно-деформированного состояния массива выполнялись в специализированном программном комплексе PLAXIS 3D. Эта программа основана на методе конечных элементов и предназначена для расчета деформаций, фильтрации и устойчивости в различных инженерных и геотехнических проектах. Процедура расчета основана на численных методах механики сплошной среды [32-34].

Методика расчета деформаций, фильтрации и устойчивости в различных инженерных и геотехнических проектах

Согласно теории метода конечных элементов, сплошная среда делится на определенное число (объемных) элементов. Каждый элемент состоит из нескольких узлов. Каждый узел имеет несколько степеней свободы, которые соответствуют дискретным значениям неизвестных величин в решаемой краевой задаче.

Согласно теории деформаций степени свободы соответствуют компонентам перемещений. В пределах одного элемента поле перемещений u определяется на основе дискретных узловых значений вектора v при использовании интерполирующих функций.

Работа в программе начинается с создания проекта, где указывается название проекта и размерности параметров, используемых при моделировании (расстояние — м, сила — кН, время — дни). Также задаются геометрические размеры области построения в плане путем указания граничных координат $X_{\max}, X_{\min}, Y_{\max}, Y_{\min}$.

Первый этап создания модели заключается в моделировании массива в режиме Soil с помощью информации, полученной из геологических колонок. В данной работе рассмотрен участок с однородным геологическим строением вмещающих пород. Затем в окне материалов «Material sets» необходимо задать модели материалов согласно исходным геологическим данным.

При нажатии кнопки «New...» в открывшемся окне указываем физико-механические и деформационные характеристики. На первой вкладке «General» вводится название и выбирается цвет слоя.

Для моделирования массива с учетом деформационного поведения был выбран тип поведения материала — упруго-пластическая модель с упрочнением грунта (HS — Hardening Soil). Эта модель хорошо зарекомендовала себя в геомеханических исследованиях по моделированию деформирования грунтов [35–37]. В этой модели, согласно критерию разрушения Кулона-Мора, предельное напряженное состояние описывается тремя параметрами: углом внутреннего трения φ , сцеплением c , углом дилатансии ψ . Жесткость слоев грунта задается тремя различными показателями: жесткость при трехосном нагружении E_{50} , жесткость при разгрузке E_{ur} , жесткость при нагружении в одометре E_{oed} . Также указываются значения объемного веса ненасыщенного и насыщенного грунта, которые в данной работе были приняты одинаковыми (табл. 1). После задания всех слоев получаем завершённую объемную модель вмещающего массива с заданными свойствами.

Моделирование геометрии объекта исследования, то есть поверхности карьера, производится в режиме «Structures». Предварительно в системе автоматизированного проектирования «Civil 3D» была построена поверхность по верхним и нижним бровкам карьера. Далее файл созданной поверхности был сохранен в формате .dxf и импортирован с помощью функции «Import structures» в исходных координатах в программу «Plaxis 3D». В результате выполнения операции в существующую модель была произведена загрузка поверхностей и полилиний (рис. 2).

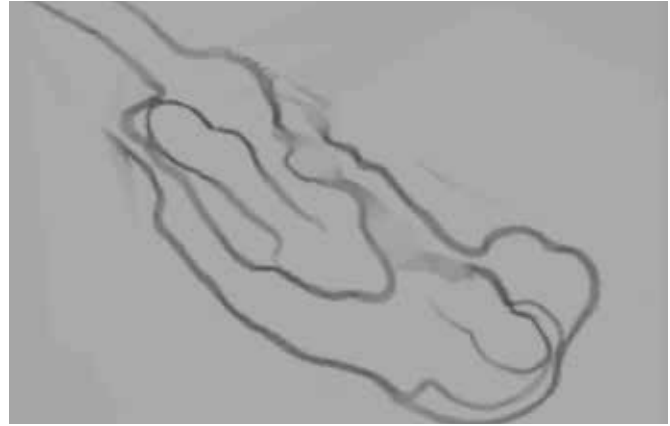


Рис. 2. Поверхность карьера в Plaxis3D [составлено авторами]
Fig. 2. Open pit mine configuration [compiled by the authors]

Следующим шагом создания модели является генерация сетки конечных элементов в режиме «Mesh». Для проведения расчета модель необходимо разбить на сплошную сеть конечных элементов. При построении сетки учитываются напластование грунта, конструктивные объекты, нагрузки и граничные условия. В программном комплексе «PLAXIS 3D» в качестве конечных элементов используются тетраэдры, в каждом из которых находится 10 узлов (точек расчета).

Для создания сетки необходимо выбрать команду «Построить сетку» — «Generate Mesh». Для всего породного массива выбираем крупный относительный размер сетки — «Coarse», что обусловлено значительными геометрическими размерами модели. Сетка строится в автоматическом режиме. В программном комплексе предусмотрена возможность локального измельчения сетки, но в рамках данной работы эта операция не производилась с целью сокращения времени расчета НДС массива.

Затем производится задание этапов расчета — фаз. Первая фаза «Initial phase» соответствует исходному напряженному состоянию массива до проведения в нем горных выработок. Для моделирования выемки карьера необходимо создать новую фазу — «Phase 1». Затем в поле чертежа нужно выделить массив внутри карьера и деактивировать его с помощью команды «Deactivate». Далее производим расчет, выбрав функцию «Calculate» на вертикальной панели, после чего открывается окно просмотра результатов расчета. Фаза расчета устойчивости «Safety» в программном комплексе Plaxis 3D в данной работе рассчитана не была из-за значительных величин деформаций, локализованных на вышеописанных участках. Напряженно-деформированное состояние массива было изучено на основе анализа напряжений, деформаций и сдвижений модели.

Результаты исследований

Результаты расчета позволяют анализировать полученные напряжения, деформации и сдвигения в массиве для каждой фазы расчета. Вначале рассмотрим вертикальную составляющую нормального напряжения на 1-й фазе (естественное поле напряжений). Первоначальное напряженное состояние нетронутого массива рассмотрим по вертикальной σ_z и горизонтальным составляющим напряжений σ_x и σ_y .

Таблица 1 / Table 1

Свойства массива / Soil properties								
Характеристика / Characteristics	γ , кН/м ³ / kN/m ³	E_{50} , МПа / MPa	E_{oed} , МПа / MPa	E_{ur} , МПа / MPa	c , кН/м ² / kN/m ²	φ , °	ψ , °	ν , кН/м ² / kN/m ²
Значение / Values	19,5	32	32	96	17	30	0	0.4

(они же будут здесь главными напряжениями σ_1 , σ_2 и σ_3 , касательные по этим площадкам будут равны нулю).

Напряжённое состояние массива здесь меняется с глубиной за счёт увеличения вертикальной составляющей (σ_z), соответствующей весу столба налегающих пород. Напряжения на поверхности отсутствуют. По всей толще проявляются сжимающие напряжения, которые с увеличением глубины достигают значений 1365 кН/м^2 на нижней границе модели (рис. 3).

В процессе выемки горной массы происходит нарушение природного равновесного состояния исходного породного массива, что приводит к перераспределению напряжений.

На фазе выемки мы можем наблюдать, что происходит

перераспределение напряжений в массиве (рис. 4). Так, на каждом уступе возникает совокупность напряжений, похожих на те, что были у поверхности у нетронутого массива. Но, так как на каждом уступе картина дублируется, в местах перегибов возникает напряжение разных знаков (от положительных и околонулевых напряжений массив по мере движения вниз по уступу резко приобретает отрицательные значения напряжений). Аналогичным образом ведет себя горизонтальная составляющая напряжений (рис. 5, 6).

Касательные напряжения в данной фазе рассмотрим по относительному касательному напряжению τ_{rel} . Являясь отношением максимальных касательных напряжений в дан-

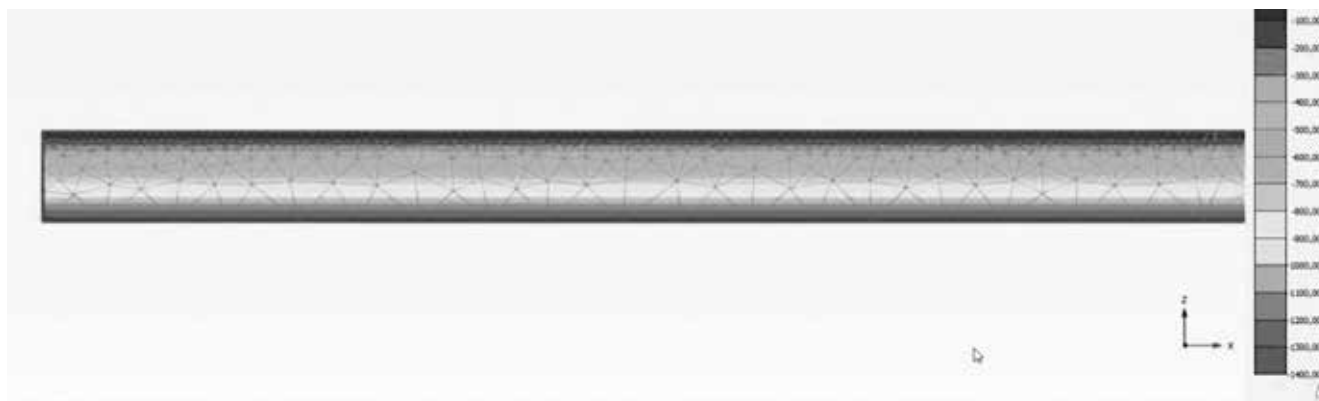


Рис. 3. Вертикальная составляющая нормального напряжения σ_z начальной фазы [составлено авторами]

Fig. 3. Vertical component of normal stress σ_z of the initial phase [compiled by the authors]

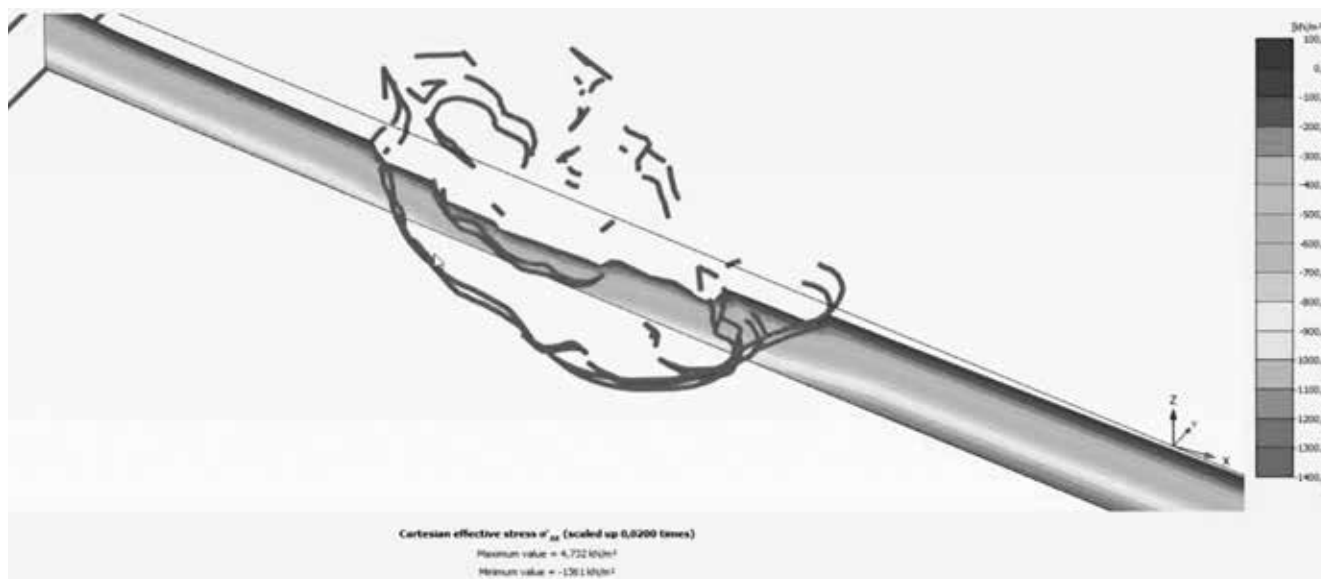


Рис. 4. Вертикальная составляющая нормального напряжения σ_z [составлено авторами]

Fig. 4. Vertical component of normal stress σ_z [compiled by the authors]

ной точке массива к значению предельного касательного напряжения для данной породы, оно характеризует степень приближения пород к предельному состоянию.

После выемки породы из массива значения относительного касательного напряжения становятся высокими по всему карьеру, особенно часто высокие значения наблюдаются в местах перегибов контуров бровок, что свидетельствует о концентрации напряжений на этих участках (рис. 7).

Далее проводится анализ деформаций породного массива. Анализ вертикальной составляющей деформаций модели показывает, что высокие значения вертикальных деформаций возникают на участках с резко меняющейся кривизной

и высотой уступа (рис. 8).

Горизонтальные деформации локализованы аналогичным образом по сравнению с вертикальными, но являются менее выраженными (рис. 9).

Из анализа вертикальных сдвижений следует, что наибольшие сдвижения возникают в местах с перегибом и резко меняющейся кривизной уступа (рис. 10). Также прослеживается тенденция увеличения сдвижений по фазам расчета на участках перегибов, описанных ранее.

Анализ горизонтальной составляющей сдвижения вблизи массива показал, что наибольшие значения достигаются в местах перегибов контуров (рис. 11).

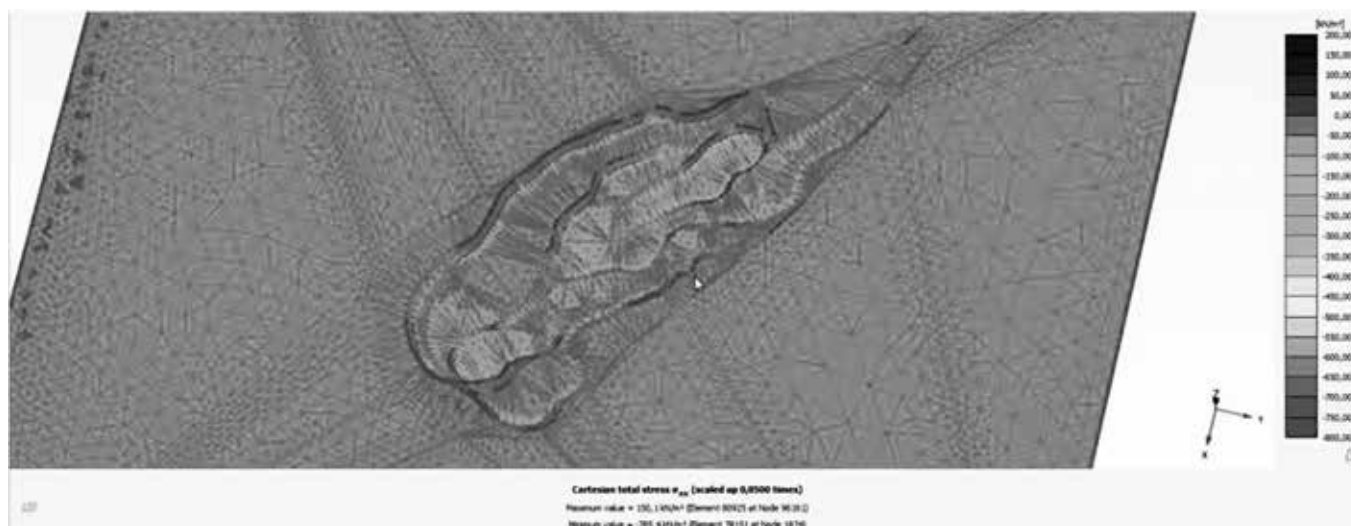


Рис. 5. Горизонтальная составляющая напряжений σ_x [составлено авторами]
 Fig. 5. Horizontal stress component σ_x [compiled by the authors]



Рис. 6. Горизонтальная составляющая напряжений σ_y [составлено авторами]
 Fig. 6. Horizontal stress component σ_y [compiled by the authors]

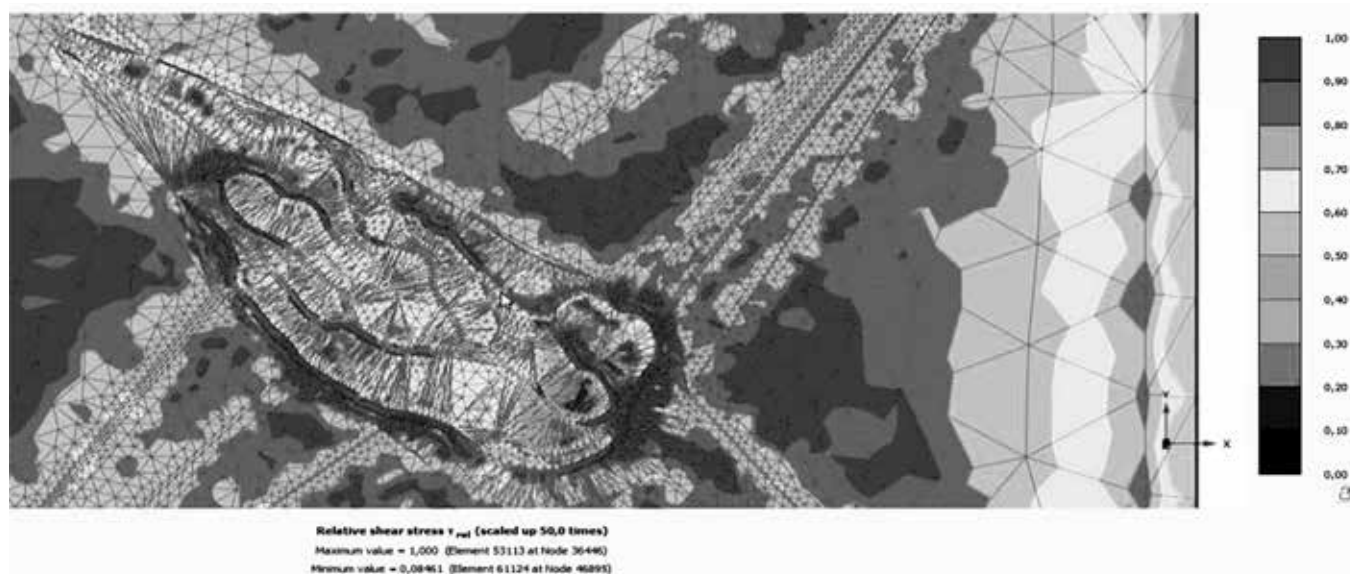


Рис. 7. Распределение относительных касательных напряжений τ_{rel} [составлено авторами]
 Fig. 7. Distribution of relative shear stresses τ_{rel} [compiled by the authors]

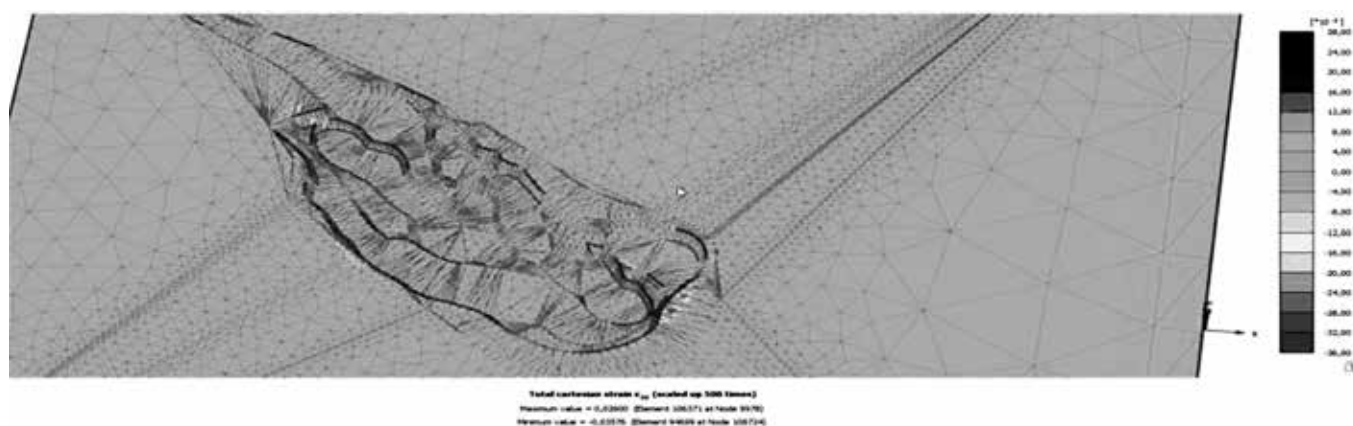


Рис. 8. Вертикальная составляющая деформаций ε_z [составлено авторами]
Fig. 8. Vertical component of deformation ε_z [compiled by the authors]



Рис. 9. Горизонтальная составляющая деформаций ε_x [составлено авторами]
Fig. 9. Horizontal component of deformation ε_x [compiled by the authors]

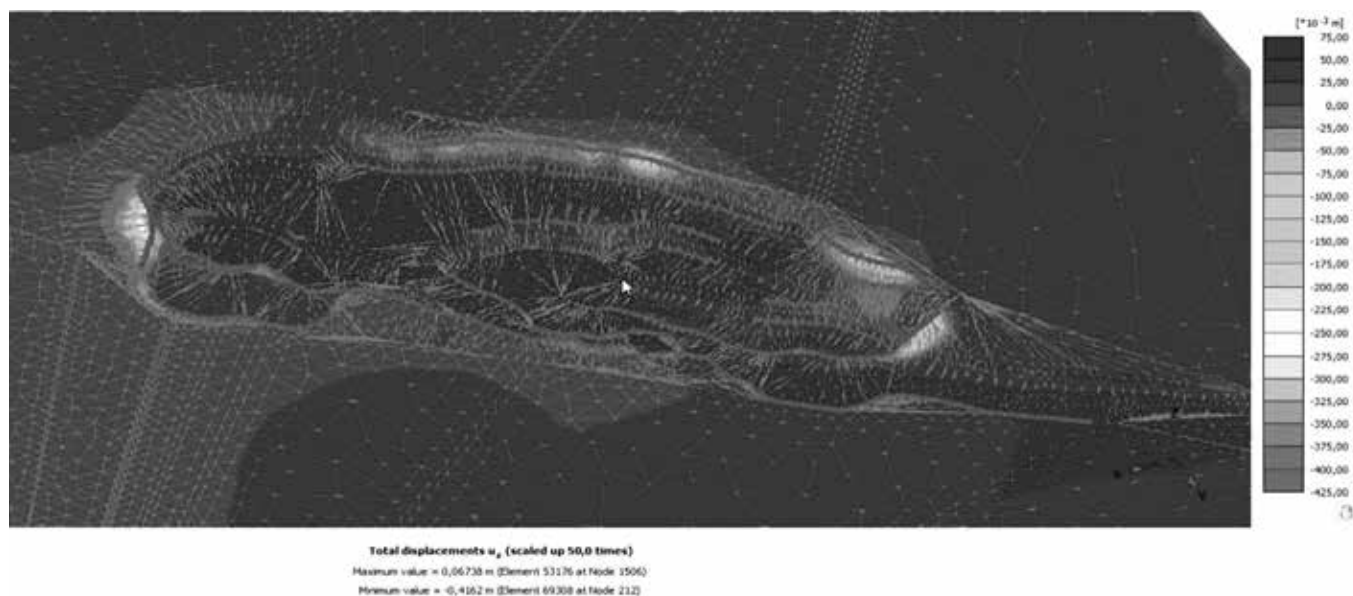


Рис. 10. Вертикальная составляющая сдвижений u_z [составлено авторами]
Fig. 10. Vertical component of displacements u_z [compiled by the authors]

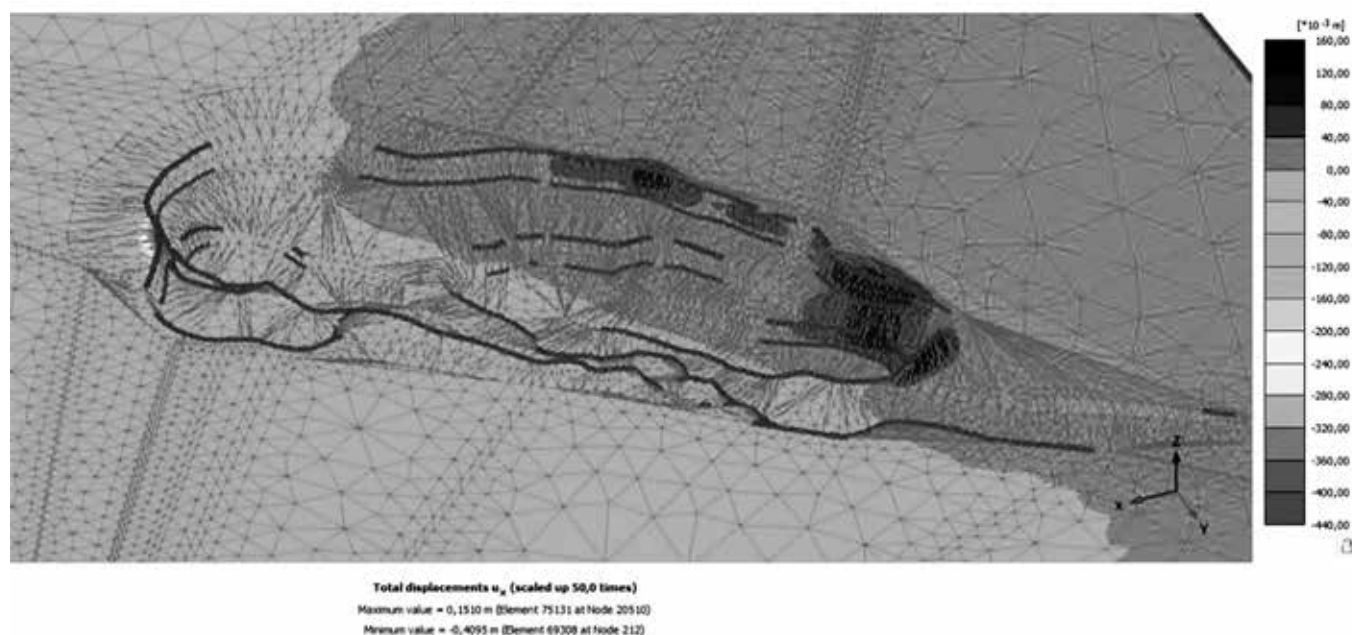


Рис. 11. Горизонтальная составляющая сдвижений u_x [составлено авторами]
Fig. 11. Horizontal component of displacements u_x [compiled by the authors]

Обсуждение результатов исследований

На рис. 12 показана существующая на карьере профильная линия реперов (профильная линия 1). Основываясь на результатах выполненного прогнозного анализа НДС массива, можно рекомендовать закладку дополнительных профильных линий 2 и 3 на участках повышенных напряжений и деформаций, и как следствие, наибольших ожидаемых сдвижений массива, которые могут привести к нарушению устойчивости бортов карьера.

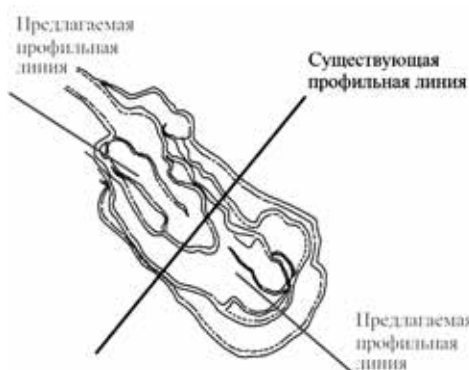


Рис. 12. Существующая и проектируемые профильные линии на карьере [составлено авторами]

Fig. 12. Existing and projected profile lines at the quarry [compiled by the authors]

Заключение

При анализе напряженно-деформированного состояния породного массива были определены локализации напряжений, сдвижений и деформаций, а также установлены связи между появлением и развитием этих параметров.

При «пологой», плавной геометрии уступов достигается устойчивое состояние массива. Наиболее значительные величины деформаций и сдвижений возникают в местах перегибов контуров бровок, вследствие образования зон повышенных напряжений.

Выводы

1. В статье рассмотрен актуальный вопрос прогноза сдвижений и деформаций карьера сложной формы, характеризующейся криволинейностью бортов в плане.
2. На основании полученных прогнозных значений деформаций сделан вывод о расположении наиболее опасных участков с точки зрения проявления деформационных процессов и дальнейшего возможного нарушения устойчивости бортов карьера. Установлено, что выявленные участки не вполне совпадают с зонами, на которых проводятся натурные мониторинговые наблюдения.
3. Сформулированы рекомендации по улучшению проекта мониторинга путем организации дополнительных натурных наблюдений в выявленных опасных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Quelopana A, Navarra A. Integration of strategic open-pit mine planning into hierarchical artificial intelligence. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021;123:63-70. DOI: 10.17159/2411- 9717/1367/2021.
2. Шабаров АН, Носков ВА, Павлович АА, Черепов АА. Понятие геомеханического риска при ведении открытых горных работ. *Горный журнал*. 2022;(9):22-28. [Shabarov AN, Noskov VA, Pavlovich AA, Cherepov AA. The concept of geomechanical risk in open mining. *Mining journal*. 2022;(9):22-8 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.
3. Захаров ВН, Гвишиани АД, Вайсберг ЛА, Дзеранов БВ. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем. *Горный журнал*. 2021;11:45-52. [Zakharov VN, Gvishiani AD, Vaisberg LA, Zhernov BV. Big data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Mining Journal*. 2021;11:45-52 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.
4. Tong X, Liu X, Chen P, et al. Integration of UAV-Based Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Three-Dimensional Mapping and Monitoring of Open-Pit Mine Areas. *Remote Sens*. 2015;7:6635-62. DOI: 10.3390/rs70606635.

5. Выстрчил МГ, Гусев ВН, Сухов АК. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна. *Записки Горного института*. 2023;262:562-579. [Vystrchil MG, Gusev VN, Sukhov AK. The method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:562-79 (In Russ.)].
6. Илюхин ДА, Маринин МА, Рахманов ДА. Исследование параметров развала взорванной горной массы фотограмметрическим методом съемки. *Горный журнал*. 2023;(9):12-21. [Ilyukhin DA, Marinin MA, Rakhmanov DA. Investigation of the parameters of the collapse of an exploded rock mass by the photogrammetric survey. *Mining Journal*. 2023;9:12-21 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02.
7. Pravdina EA. Laser scanner data capture time management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(5):1649-61.
8. Вальков ВА, Виноградов КП, Валькова ЕО, Мустафин МГ. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки. *Геодезия и картография*. 2022;83(11):40-49. [Valkov VA, Vinogradov KP, Valkova EO, Mustafin MG. Creating rasters of high information content based on laser scanning and aerial photography. *Geodesy and cartography*. 2022;83(11):40-9 (In Russ.)]. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.
9. Гусев ВН, Блищенко АА, Санникова АП. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера. *Записки Горного института*. 2022;254:173-179. [Gusev VN, Blishchenko AA, Sannikova AP. Study of a complex of factors influencing the error in the implementation of surveying of mountain objects using a geodetic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:173-79 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
10. Ле ХЧ, Зеньков ИВ, Тхи ТН, Юронен ЮП. Исследование изменения состояния растительного покрова в районе открытой разработки месторождения медных руд Шинь Куен во Вьетнаме по данным спутниковой съемки. *Горный журнал*. 2022;(2):88-92. [Le HT, Zenkov IV, Thi TN, Yuronen YuP. Vegetation mantle change in the open pit mining area of Sin Quyen Copper Mine in Vietnam by satellite imagery data. *Mining Journal*. 2022;2:88-92 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.14.
11. Павлович АА, Коршунов ВА, Бажуков АА, Мельников НЯ. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом. *Записки Горного института*. 2019;239:502-509. [Pavlovich AA, Korshunov VA, Bazhukov AA, Melnikov NYa. Assessment of the strength of the rock mass during the development of deposits by open method. *Journal of Mining Institute*. 2019;239:502-9 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.
12. Господариков АП, Ревин ИЕ, Морозов КВ. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит». *Записки Горного института*. 2023;262:571-580. [Gospodarikov AP, Revin IE, Morozov KV. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:571-80 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2023.9.
13. Протосеня АГ, Беляков НА, Буслова МА. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением. *Записки Горного института*. 2023;262:619-627. [Protosenya AG, Belyakov NA, Buslova MA. Modeling the stress-strain state of a block rock massif of ore deposits during mining by collapse mining systems. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:619-27 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2023.9.
14. Фисенко ГЛ. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с. [Fisenko GL. Stability of the sides of quarries and dumps. Moscow, 1965 (In Russ.)].
15. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. Л.: ВНИМИ, 1987. 127 с. [Methodological guidelines for calculating the stability and bearing capacity of dumps. Leningrad, 1987 (In Russ.)].
16. ФНП ПБ "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов": утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 г. N 439. [Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps]: approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated November 13, 2020 N 439. (In Russ.)].
17. Деменков ПА, Комолов ВВ. Исследование влияния строительства глубоких котлованов на оседания массива в плоской и пространственной постановке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;6:97-110. [Demenkov PA, Komolov VV. Investigation of the influence of the construction of deep pits on the subsidence of the massif in a flat and spatial setting. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2023;6:97-110 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_97.
18. McQuillan A, Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023;123(2):63-70. DOI: 10.17159/2411-9717/2425/2023.
19. Шпаков ПС, Долгоносов ВН, Нагибин АА, Кайгородова ЕВ. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного пространства в программе "Phase 2". *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(9):59-66. [Shpakov PS, Dolgonosov VN, Nagibin AA, Kaigorodova EV. Numerical modeling of the stress-strain state of an array in the vicinity of a cleaning space in the "Phase 2" program. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;9:59-66 (In Russ.)].
20. Новоженин СЮ, Митусова НМ. Оценка устойчивости бортов карьеров, отвалов горных пород на основе метода математического моделирования с использованием программного комплекса "Plaxis 3D". *Маркшейдерский вестник*. 2022;1(146):33-38. [Novozhenin SYu, Mitusova NM. Assessment of the stability of the sides of quarries, rock dumps based on the method of mathematical modeling using the software package "PLAXIS 3D". *Mine Surveying Bulletin*. 2022;1(146):33-38 (In Russ.)].

21. Беляев ЕН, Бурдонов АЕ, Мурзин НВ. Прогнозирование и оценка устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов на каменноугольном месторождении с использованием программных комплексов GEOSTUDIO И PLAXIS 3D. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2023;(1):138-154. [Belyaev EN, Burdonov AE, Murzin NV. Prediction and evaluation of the stability of sides, section lips and slopes in a coal deposits using the GEOSTUDIO and PLAXIS 3D software complexes. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2023;(1):138-54 (In Russ.)].
22. Бринкгрив РБ. Дж. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. СПб: ООО "НИП-Информатика". 2017. 816 с. [Brinkgreve R.B.J. PLAXIS 3D. User Manual. St. Petersburg: LLC NIP-Informatics. 2017 (In Russ.)].
23. Глазунов ВВ, Бурлуцкий СБ, Шувалова РА, Жданов СВ. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики. *Записки Горного института*. 2022;257:771-782. [Glazunov VV, Burlutsky SB, Shuvalova RA, Zhdanov SV. Increasing the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on accounting for engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:771-82 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
24. Мустафин МГ, Валькова ЕО, Вальков ВА. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров. *Маркшейдерский вестник*. 2022;3(148):13-18. [Mustafin MG, Valkova EO, Valkov VA. Ways of development of surveying and geodetic observations for the stability of quarry sides. *Mine Surveying Bulletin*. 2022;3(148):13-8 (In Russ.)].
25. Демьянов ВВ, Простов СМ, Хямяляйнен ВА, Щербakov ИВ. Компьютерное моделирование напряженного состояния уступов бортов карьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(7):141-144. [Demyanov VV, Prostop SM, Khamalyainen VA, et al. Computer simulation of the stress state of the ledges of the sides of quarries. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2006;(7):141-44 (In Russ.)].
26. Wang P, Ren F, Miao S, et al. Evaluation of the anisotropy and directionality of a jointed rock mass under numerical direct shear tests. *Engineering Geology*. 2017;225:29-41. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.03.004.
27. Карташов ЮМ, Матвеев ВВ, Михеев ГВ, Фадеев АБ. Прочность и деформируемость горных пород; под общ. ред. АБ Фадеев. Москва: Недра, 1979. 269 с. [Fadeev AB, Kartashov YuM, Matveev BV, Mikheev GV. Strength and deformability of rocks. Moscow, 1979 (In Russ.)].
28. Турчанинов ИА, Иофис МА, Каспарьян ЭВ. Основы механики горных пород. Ленинград: Недра, Ленинградское отделение, 1977. 503 с. [Turchaninov IA, Iofis MA, Kasparyan EV. Fundamentals of rock mechanics. Leningrad, 1977 (In Russ.)].
29. Съедина СА, Балтиева АА, Шамганова ЛС. Разработка 3D геомеханических моделей для подземных рудников и карьеров. *Проблемы недропользования*. 2018;(1):60-65. [Sedina SA, Baltieva AA, Shamganova LS. Development of 3D geomechanical models for underground mines and quarries. *Problems of subsoil Use*. 2018;(1):60-5 (In Russ.)].
30. Мустафин МГ, Панченко АВ. Особенности деформирования прибортового массива горных пород с разной криволинейностью борта в плане. *Записки Горного института*. 2013;204:66-68. [Mustafin MG, Panchenko AV. Features of deformation of the instrument array of rocks with different curvilinearity of the side in the plan. *Notes of the Mining Institute*. 2013;204:66-8 (In Russ.)].
31. Косолапов АИ, Пташник АИ, Пташник ЮП. Исследование влияния формы борта карьера в плане на эффективность производства и последующего освоения техногенных горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(1):73-78. [Kosolapov AI, Ptashnik AI, Ptashnik YuP. Study of the developed quarry shape taking into account the efficiency of production and implementation of technogenic mining operations. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(1):73-8 (In Russ.)].
32. Фадеев АБ. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва: Недра, 1987. 220 с. [Fadeev AB. Finite element method in geomechanics. Moscow, 1987 (In Russ.)].
33. Булавин ВФ, Яхричев ВВ. Метод конечных элементов: нестандартные решения для матрицы жесткости. *Современные материалы, техника и технологии*. 2016;4(7):28-32. [Bulavin VF., Yahrichev VV. Finite element method: non-standard solutions for the stiffness matrix. *Modern materials, technics and technologies*. 2016;4(7):28-32 (In Russ.)].
34. Федоренко ЕВ. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик. *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2013;6(49):24-26. [Fedorenko EV. Method of calculating stability by reducing strength characteristics. Transport of the Russian Federation. *Journal of Science, Practice, Economics*. 2013;6(49):24-6 (In Russ.)].
35. Алексеев АВ, Иовлев ГА. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019;4(4):75-87. [Alekseev AV, Iovlev GA. Adaptation of the model of hardening soil (hardening soil) for engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;(4):75-87 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.
36. Мельников РВ. Компрессионные испытания грунта как способ определения параметров модели Hardening Soil. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2014;(4):90-94. [Melnikov RV. Compression tests of soil as a way to determine the parameters of the Hardening Soil model. *Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN*. 2014;(4):90-4 (In Russ.)].
37. Багаутдинов ИИ, Беляков НА, Севрюков ВВ, Рассказов МИ. Применение модели упрочняющегося грунта для прогноза зоны пластических деформаций массива слабоустойчивых пород Яковлевского железорудного месторождения. *Горный журнал*. 2022;(12):25-29. [Bagautdinov II, Belyakov NA, Sevryukov VV, Rasskazov MI. Application of a hardening soil model to predict the zone of plastic deformation of a massif of weakly stable rocks of the Yakovlevsky iron ore deposit. *Mining journal*. 2022;(12):25-9 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Новоженин Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: novozheninsyu@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57192376914



Волошина Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pravdina_ea@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57164048000



Маркус Александр Владимирович – маркшейдер, АО «Полюс Алдан», респ. Саха (Якутия), уч. Алданский, п. Нижний Куранах, Россия, e-mail: s.markus1494@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sergey Yu. Novozhenin - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg mining university, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: novozhenin_syu@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57192376914

Ekaterina A. Voloshina - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg mining university, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: pravdina_ea@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57164048000

Alexander V. Markus – mine surveyor, Polyus Aldan JSC, Rep. Sakha (Yakutia), uch. Aldansky, Nizhny Kuranakh village, Russian Federation, e-mail: s.markus1494@yandex.ru

Вклад авторов / Contribution:

Новоженин С. Ю. – генерация идеи, постановка цели исследования, написание текста статьи; Волошина Е. А. – систематизация материала, анализ результатов; Маркус А. В. – сбор данных, проведение моделирования / Novozhenin S. Yu. – generation of an idea, setting a research goal, writing the text of an article; Voloshina E. A. – systematization of the material, analysis of the results; Markus A. V. – data collection, modeling

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

DEFINING WORKING PARAMETERS OF CONVEYOR-TYPE PIPE FEEDING SYSTEMS FOR TRENCHLESS PIPELINE INSTALLATION AND MINING

V. Anishchenko
Robbins HDD®, USA

Abstract: Analyzing the lab and job site testing data related to friction and clamping interaction between rubber compound-lined track-type conveyors and steel pipes in pipe feeding systems used in trenchless construction the article gives insight into major engineering principles behind the distribution of forces and reactions inside conveyor-based pipe feeding systems with axial force over 200 tons and discloses the relation between the parameters of the pipe and working characteristics of the continuous pipe feeding system. The research allowed to determine the necessary clamping force developed by a 200-ton machine, maximum achievable friction factor consistent with the strength of steel rubber-coated conveyor plates and the ability of the most popular pipes used in trenchless industry to withstand the radial loads communicated by rubber-coated pads of the pipe feeder.

Keywords: friction and clamping interaction, rubber compound-lined track-type conveyors, pipe feeding systems, clamping force, friction factor, trenchless industry

For citation: Anishchenko V. Defining working parameters of conveyor-type pipe feeding systems for trenchless pipeline installation and mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):130-135. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_130_135.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМ ПОДАЧИ ТРУБ ДЛЯ БЕСТРАНШЕЙНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В. Анищенко
Буровая компания Robbins HDD®, USA

Аннотация: Приведены результаты лабораторных испытаний и полевого тестирования гусеничных конвейеров с обрезиненными металлическими пластинами для непрерывной осевой подачи стальных труб конвейерного типа, используемых в бестраншейном строительстве. Выполненные исследования дают представление об основных инженерных принципах, лежащих в основе распределения усилий и реакций внутри конвейерных систем подачи труб с осевым усилием более 200 тонн, а также раскрывают взаимосвязь между параметрами трубы и рабочими характеристиками системы непрерывной подачи труб. Исследования позволили определить: необходимое радиальное усилие, создаваемое 200-тонной машиной; максимально достижимый коэффициент трения, соответствующий прочности стальных конвейерных плит с резиновым покрытием; способность наиболее популярных труб, используемых в бестраншейной промышленности, выдерживать радиальные нагрузки, передаваемые обрезиненными пластинами толкателя труб.

Ключевые слова: трение и радиальные усилия, гусеничный конвейер с обрезиненными металлическими пластинами, системы осевой подачи труб, радиальное усилие, коэффициент трения, бестраншейная технология прокладки труб

Для цитирования: Анищенко В. Определение рабочих параметров конвейерных систем подачи труб для бестраншейного трубопроводного строительства и скважинной добычи полезных ископаемых. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 130-135. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_130_135.

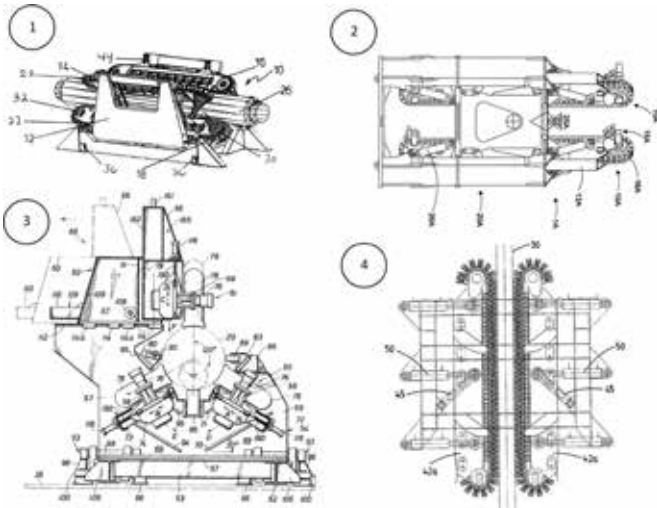
Introduction

Over the course of their long history drilling, mining and pipeline industries set multiple objectives related to the design of devices for axial translocation of pipes and cables. Various companies have solved these problems in different ways and the

existence of a large number of modifications of these devices and patents for their design, as well as related technologies, prove the importance of finding the answer to the question of the most optimal design of a pipe pusher and its maximum operating parameters.

Materials and Methods

On the 21st of October 1970 J. Ray McDermott & Co., Inc, New Orleans, LA filed a patent for a PIPE TENSIONING APPARATUS [1] (pipe feeder), which had a series of independently driven traction wheels located radially around the pipeline. Such pipe tensioning devices have been used in line to feed pipelines and cables from pipeline ship decks to the sea bottom along with other types of pipe feeding systems. See picture 1.



Picture 1. Pipe tensioners (sometimes referred to as pipe feeders): 1-Invented by Ottmar Diehl in 2006; 2-Invented by Andrew Harrop, Ludovic Lacan, Martin Pierre, Paul McMillan in 2018, 3- Invented by Edwin J. Dressel, Warren A. Petrie, Clarence W. Shaw, Janis Grinbergs, John Isakson, Martin Adams in 1972; 4- Invented by Joop Roodenburg, Terence Willem August, Wehmeijer, Den Haag in 2011

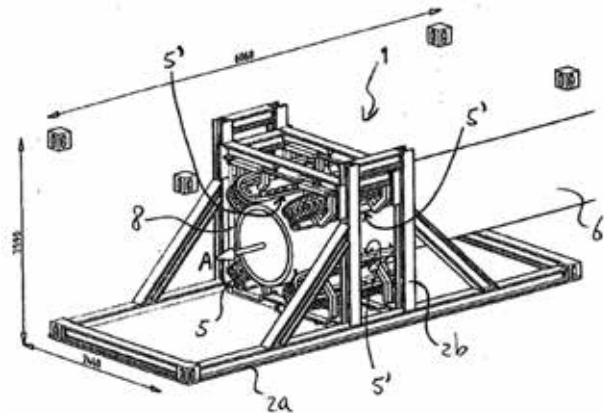
Рисунок 1. Устройства для натяжения труб (иногда называемые устройствами подачи труб): 1 - Изобретено Оттмаром Дилем в 2006 году; 2 - Изобретено Эндрю Харропом, Людовиком Лаканом, Мартином Пьером, Полом Макмилланом в 2018 году; 3 - Изобретено Эдвином Дж. Дресселом, Уорреном А. Петри, Кларенсом У. Шоу, Янис Гринбергс, Джон Исаксон, Мартин Адамс в 1972 году; 4 - Изобретено Йоопом Руденбургом, Теренсом Виллемом Августом, Вехмейером, Ден Хаагом в 2011 году

Similar patents for pipe tensioning devices were filed between 2005 and 2018 [2-4]. These pipe tensioners or pipe feeders for marine industry and horizontal directional operations were built with tracks, not wheels. The most popular conveyor-based pipe feeders, which were built for horizontal directional drilling by the Dutch company Van Leeuwen [5] are capable of the maximum axial thrust of 130 tons even for pipelines of large diameters: see Picture 2.

If a pipe feeder should be used in HDD, it should be commensurate with the thrust force of an HDD rig [6]. The necessary thrust force of a horizontal directional drilling rig used for construction depends on the diameter and wall thickness of the pipeline, length of the crossing, drilling trajectory and geological conditions in the formation [7,8].

The most popular drilling rigs used for HDD trunk pipeline crossings range between 150 and 400 tons. The cylinder driven pipe pushing devices (Pipe Thruster by Herrenknecht, Pipe Pusher by Prime Drilling and MTS) used to communicate additional axial force in pipe pulling operations and emergency situations when the steel pipe gets stuck in the drill hole and needs to be salvaged by pulling out of the hole from the pipe side range between 300 and 750 tons (see picture 3). In extremely complicated projects two 750-ton pipe thrusters are used in line with each other to pull or push one pipeline

with the combined axial force of 1500 tons. The most cylinder driven pipe pushers have been effective, but they are heavy, require extremely complicated foundations, cannot feed the pipeline continuously stopping the clamping unit to reverse it every 3-4 meters of the pipe. Every time the pipeline stops, it is necessary to overcome static friction and the thrust force diagram shows peak values every time the pipe starts moving whereas conveyor-based pipe feeding systems do not need to waste time on reverse motion and require less thrust reserve offering better control of the face pressure.



Picture 2. Pipeline pressure device with endless conveyor members for use during a horizontal directional drilling process by Gebr. Van Leeuwen Harmelen B.V. (published in 2010)

Рисунок 2. Толкатель трубопровода с бесконечными конвейерными элементами для использования в процессе горизонтально-направленного бурения, разработанное компанией Ван Левен Хармелен Б.В. (опубликовано в 2010 году)



Picture 3. Cylinder based pipe thruster produced by the German company Herrenknecht since 2006

Рисунок 3. Доталкиватель труб с цилиндрами, выпускаемый немецкой компанией Herrenknecht с 2006 года

Due to relatively small thrust force of conveyor-based pipe feeders they are rarely used in big pipeline operations, as it is necessary to use too many small pipe feeders to match at least a 500 ton pipe pusher of the cylinder type [9]. Hence, it is necessary to increase the possible thrust force of single conveyor-based pipe feeder to use two 250 ton pipe feeders instead of 4 smaller units.

The difficulty of designing and building a 200 or 250 ton conveyor-based pipe feeder resides in the necessity to achieve a formidable clamping force for maximum friction between the pads of the pipe feeder and the surface of the pipe. It is clear that the necessary compression for achieving thrust beyond 250 tons will break some of standard steel and plastic pipes and the device will not be universal for all pipes. But it is possible to build a machine

with adjustable clamping force [10,11]. Hence, it is expedient to conduct research activities in the direction of the achievable friction and maximum clamping pressure on the pipe [8,12].

In 2024 Universal HDD built a 200 ton continuous pipe feeder capable of intermittent 250 tons at maximum hydraulic pressure [13] See picture 4. The patent was granted to Vasily Anishchenko in 2022.

Proceeding from the necessity to keep balance between friction and clamping force, it is necessary to analyze how continuous conveyor-based pipe feeding machines interact with pipelines at maximum loads. A pipe feeder should not compress pipes to exceed the yield point of their steel. To calculate the most effective radial force of the pipe feeder and in order to follow the conditions of the above mentioned balance, it is expedient to calculate the applicable clamping pressure and prove the applied calculation methods by communicating maximum clamping pressure to various pipes. Proceeding from permissible clamping pressure and friction factor measured in the lab for various types of pads, it can be possible to determine the maximum achievable thrust force. The primary objectives of the research should be set as follows:

1. Calculate critical radial forces related to various pipeline diameters and wall thickness, which can be pushed by a conveyor-type continuous pipe feeder with tracks of a certain length and a particular rubber-covered pad area for clamping the pipeline to achieve an axial force of 200 tons or more;



Picture 4. Pipe feeding device built by Universal HDD in 2024

Рисунок 4. Устройство для подачи труб, построенное компанией Universal HDD в 2024 году

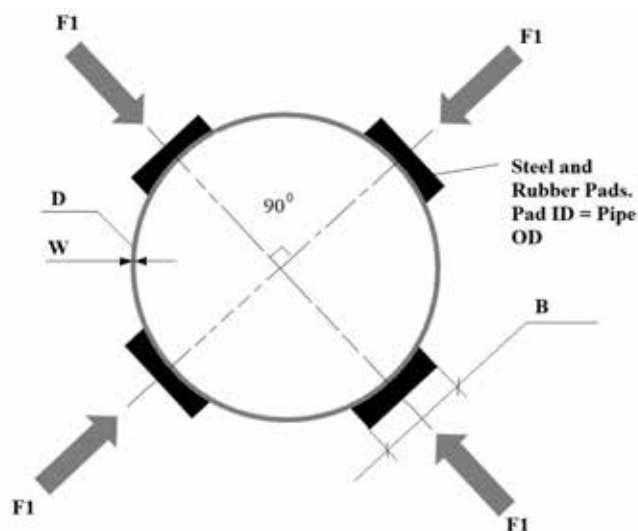
2. Define if the theoretically calculated clamping forces are commensurate with achievable friction forces between the conveyors and the pipe on a special lab stand;

3. Run practical tests on real pipes applying maximum clamping pressure on the pipe installed inside a conveyor-type pipe feeding system.

As the cylinder type 750 ton Pipe Pushers have been in use since 2005, the necessity to analyze critical forces for buckling and longitudinal compression of pipelines is not relevant. Axial pipe pushing technology proved its effectiveness over the years of use, but the compression of various pipelines by 4 track conveyors has not been analyzed yet.

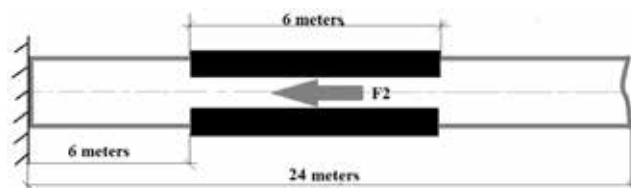
It is important to define the theoretical compression force applicable to various pipelines before experimenting with friction of pads on the pipe.

Pictures 5 and 6 describe the load schematics for the pipeline compressed between 4 conveyors. The pipeline is pressed between four sets of pads, which, communicate axial load simultaneously with the radial load. The pipeline is not filled with any gas or liquid, so it does not have any pressure inside. Hence, we can calculate the critical clamping force using finite element analysis.



Picture 5. X-sectional view of the pipe and pressing pads: permissible pressing force (F1); diameter (D); wall thickness (W) of the pipeline of certain steel and the width of the pads (B)

Рисунок 5. Поперечный разрез трубы с приложенной радиальной нагрузкой: опустимое усилие прижатия (F1), диаметр (D), толщина стенки (W) трубопровода из определенной стали и ширина прижимных пластин (B)



Picture 6. Side view of the pipe / Рисунок 6. Вид трубы сбоку

Results

In order to calculate the critical clamping force for a pipeline using finite element analysis, let us assume that the pipeline has infinite length. In this case fixing the ends of the pipe is of no importance [14,15]. The elongations and shifts in the pipe in this case should not be considered. It means that every section of the pipe in the region of the applied force is deformed in identical patterns. Thus, the critical pressure for the pipe can be defined from the equation below:

$$q_n = \frac{(n^2-1)EI}{R^3} [12] \quad (1)$$

Taking into consideration that the fundamental functions for this critical load would be $v = \sin \varphi$; $w = -n \cos \varphi$, where n - number of radial waves;

E – steel elasticity module;

I – moment of inertia of the ring;

R – ring radius.

As the pipe is not a ring and it is bent along its length due to buckling, the critical force for a pipe can be calculated from the following equation [14,15]:

$$q_n = \frac{DR \left[\left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right]}{n^2} - \frac{Eh \left[\left(\frac{m\pi}{l} \right)^4 \right]}{n^2 \left[\left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right]^3}, \quad (2)$$

where m - the number of longitudinal waves (in this case m is stipulated by the number of conveyors around the pipe);

l - the length of the conveyor in contact with the pipe.

The results of theoretical calculations of critical clamping force for pipes of various diameters and wall thickness for two different steel types taking both compression and buckling into consideration are set forth in table 1:

Table 1 / Таблица 1

**Steel Pipeline Compression Analysis /
Анализ трубопроводов на сжатие**

Pipe Dia	Pipe Wall	12" Pad	14" Pad	16" Pad	22" Pad
		Critical Force	Critical Force	Critical Force	Critical Force
Critical Force = force required (Tons) to induce Yield Stresses Based on x80, Sy=80,496 psi					
20"	0.276"	453	1,500	NA	NA
20»	0.787"	2,195	3,352	NA	NA
28»	0.354"	319	227	261	NA
28»	0.827"	1,011	1,156	1,329	NA
32»	0.354"	171	306	203	2,202
32»	0.827"	810	927	1,056	5,152
40»	0.394"	208	151	240	529
40»	0.827"	624	663	722	1,149
48»	0.472"	379	281	171	343
48»	0.827"	493	522	595	756
56»	0.630"	263	442	390	367
56»	0.827"	407	527	520	557
Critical Force = force required (Tons) to induce Yield Stresses Based on x100, Sy=94,275 psi					
20"	0.276"	531	1,757	NA	NA
20»	0.787"	2,571	3,926	NA	NA
28»	0.354"	374	266	306	NA
28»	0.827"	1,184	1,354	1,557	NA
32»	0.354"	200	359	237	2,579
32»	0.827"	949	1,085	1,237	6,034
40»	0.394"	244	177	282	620
40»	0.827"	731	776	845	1,346
48»	0.472"	444	330	201	401
48»	0.827"	577	611	697	886
56»	0.630"	308	518	457	430
56»	0.827"	477	617	609	653

It should be noted that only two diameters were used for convex surfaces to have only two types of pads for all applicable diameters.

The designed pipe feeder is equipped with 16X6 inch cylinders. The cylinders are of equal length and hold the conveyors at 45 degrees to vertical and horizontal axes. The calculation for F1 from picture 4 is drawn in table 2. The calculations are based on generally acknowledged principles of hydraulics [16]:

Table 2 / Таблица 2

**Calculation of force F1 from picture 5 for 4000 PSI /
Расчет силы F1 (см. рисунок 5) с давлением в цилиндрах
4000 фунтов на квадратный дюйм**

Parameters	Designation	Dimension	Meaning
Bore diameter of the cylinder	D	in	6,00
Pressure inside the cylinder	P	psi	4 000,00
Force developed by one cylinder	F cyl.	lbs	113 040,00
Force developed by 4 cylinders	F 4 cyl.	lbs	452 160,00
Force as indicated in diagram	F1	lbs	339 120,00

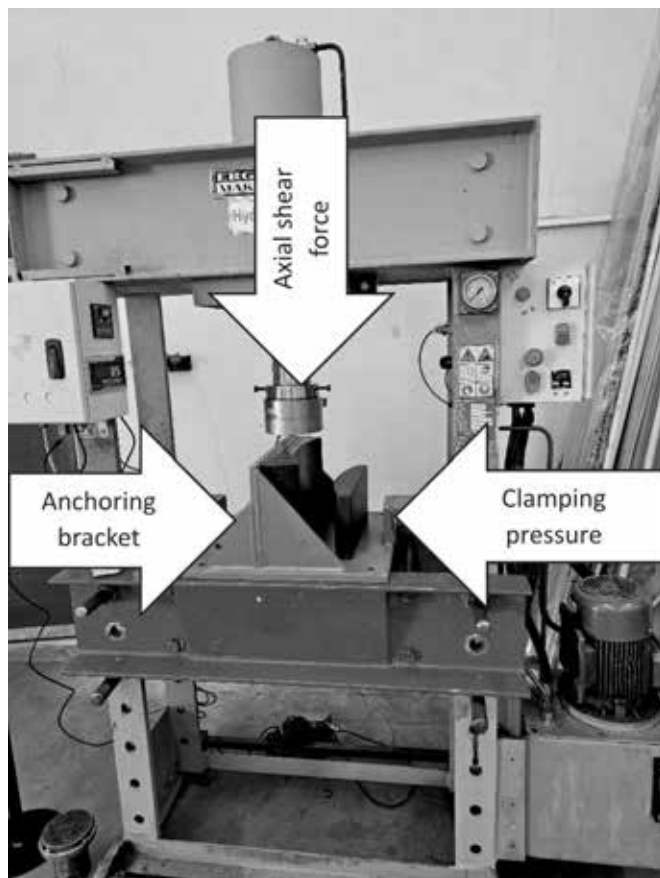
The results of the calculation show that not all pipes can be clamped with maximum pressure, but if confirmed in a practical test, the results can be used as a guideline to choose the correct pipeline

for adequate necessary axial force. It means that not all pipes can be pushed with maximum pushing force of the pipe feeder. This leaves the question of correct friction factor open. It is indispensable to make sure that the friction factor is sufficient to prevent slipping between the surfaces of the pipe and the pads. In order to calculate the necessary friction factor, it is necessary to use the sum of clamping forces of any two conveyors at 90 degrees to each other projected on one plane. The forces developed by all opposite cylinders should in this case be considered reactional. The sum of clamping forces of two groups of cylinders at 90 degrees to each other projected on a single plane is 904 320 lbs, which is 411 tons. This means that the friction factor considered while engineering the compound for steel-rubber plates for a 200 ton pipe feeder should exceed 0.5 [17]. Hence the technical solution for achieving the maximum friction factor and not damaging the pipe while clamping and pushing at the same time is a certain priority.

The balance between clamping forces and the necessary friction is essential for the design of any pipe feeding system. The paradox and the key point of the technology is the correlation between the hardness of rubber measured by durometer on the scale from 0 to 100 and the friction factor. The results of lab experiments proved the possibility to achieve the friction factor over one, but in this case the durometer showed figures below 30 on its scale. The rubber or polyurethan compound with this hardness applied to steel base does not hold the shear force necessary for 200 tons axial force. When the rubber compound durometer is raised to 90, the compound proves very strong and holds all loads, but the friction factor is below 0.4. It is impossible to theoretically predict the exact correlation between the properties of the rubber compound and achievable friction in various conditions. So the processes of developing the pipe feeding technology proved it indispensable to stage a lab experiment determining the dependence between the properties of rubber compound and friction. In order to mimic the working conditions of the system, real-size pads were installed into the frame of a hydraulic press with two perpendicular cylinders. One cylinder stood for clamping and the second cylinder worked as a substitution for friction. The simulation of the pipe surface was represented by a semi-circular polished steel plate. The laboratory test stand is shown in picture 7.

The test had to show which materials could be used for the pads and which friction factors can be developed as a result of experiment. It is understandable that polyurethane is more durable than rubber when it comes to compression, it is cheaper than rubber, and considering the formidable clamping force developed by the pipe feeder it certainly looked like the most preferable material for the high-power pipe feeding system. On the other hand, its friction factor on steel and plastic surfaces can be lower. Picture 8 shows the results of measuring the friction factor between the surface of the pipe and various types of polyurethan and rubber.

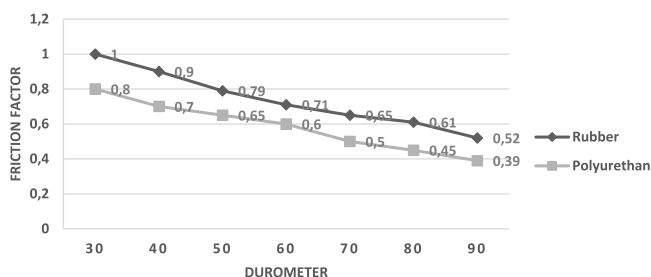
It should be noted that the experiment showed that all rubber pads with durometer below 70 and all polyurethan pads with durometer below 60 failed to hold the shear load of 200 tons divided by the number of pads in contact with the pipe at any moment of time. It means that only pads with durometer 70 for polyurethane and 80 for rubber. The test results show that the friction factor with polyurethane pads is in conflict with the friction factor requirements set forth above. Hence only rubber pads can be considered with compounds of durometer 80 and 90. As the rubber compound with durometer 80 holds the shear load and offers the highest friction factor, it should be considered the best match for the pipe feeder structure despite its high price.



Picture 7. Test stand for measuring the strength of rubber pads and friction factors

Рисунок 7. Испытательный стенд для измерения прочности обрезиненных прижимных пластин и коэффициента трения

STEEL-RUBBER PAD DUROMETER-FRICTION FACTOR CHART



Picture 8. Durometer-Friction factor dependence for rubber and polyurethane

Рисунок 8. Зависимости коэффициента трения от твердости для резины и полиуретана

Discussion

All results of calculations and lab tests can only be considered trustworthy if proven by maximum load tests on actually produced machines. The results of pad clamping-shear tests can be trustworthy for a single pad, whereas the critical clamping forces should be tested on real pipes. The design of the first Universal HDD pipe feeder was based on theory and

results of lab tests, but after it was assembled, two pipes were purchased and subjected to maximum load test at 5000 psi for the duration of 5 minutes. Picture 9 shows the pipe feeder at maximum load at 5000 psi with a 40 inch pipeline with 0.827" wall thickness. The pipe held the load the rubber-coated pads remained intact, which proved the correctness of all theoretical calculations and confirmed the chosen approach to structural analysis of the machine.



Picture 9. Pipe feeder of Universal HDD at factory tests in the shop at Lake Zurich, IL

Рисунок 9. Устройство подачи труб универсального жесткого диска на заводских испытаниях в цехе на озере Цюрих, Иллинойс

Conclusion

In conclusion it should be noted that both the structure of the pipe feeder and the pipe could hold the calculated critical force, it proved possible to develop the pipe feeding device and apply to most popular steel pipes the formidable clamping force necessary to develop the axial thrust exceeding 200 tons, which is confirmed by tests on pipes clamped in an actual 200 ton pipe feeding machine. The balance between friction and clamping force can be achieved with rubber-steel pads with rubber durometer 80 and friction factor 0.6. This research proves that it is possible to use conveyor type pipe feeding machines along with cylinder-based and rack and pinion pipe pushing devices for the construction of trenchless crossings under natural and artificial obstacles like rivers, hills, roads and railroads [18,7,19]. Several pipe feeding systems can be used along one pipeline in pipeline installations for trenchless and marine industry, the new equipment can be used for drilling evacuation galleries in mining or for mining ores from large diameter drill holes. The use of such powerful machines with micro tunneling equipment helps operators to keep continuous pressure on the face and increase tunneling speed.

The main advantage of such systems is their light weight and the absence of the need to build massive foundations, the technology allows the use of standard anchor solutions for HDD machines. There is no need for a crane during the installation of a pipe feeder with tracked conveyors, while a 150-ton crane is necessary to install a cylinder-driven pusher and one clamping unit of this machine without the main jacking cylinder weighs as an entire conveyor-type pipe feeder. Therefore, the design and production of a powerful continuous pipe feeder is a promising direction of technological development in the mining industry.

REFERENCES

1. United States Patent number 3,658,222 from Apr.25, 1972, PIPE TENSIONING APPARATUS, Inventors: Edwin J. Dressel; Warren A. Petrie, New Orleans; Clarence W. Shaw, Metairie, La; Janis Grinbergs, Seattle, Wash; John E. Isakson, Stanwood, Wash; John E. Isakson, Stanwood, Wash; Martin C. Adams; Lynwood; Wash filed on Oct. 21, 1970 application number 82,851.
2. Trenchless pipeline installation system. US permanent patent number US10837236 Inventor: Vasily Anishchenko and Philip Suhm, November 17, 2020.
3. UK Patent Application GB 2561375 A PIPE TENSIONER WITH A LOCAD SENSOR IN A TENSIONING PAD filed on 17.10.2018 by Technip France, inventors: Andrew Harrop, Lodovic Lacan, Martin Pierre, Paul McMillan.
4. United States Patent Published on Sep. 21, 2005, Pub. No.: US2006/0208245A1 PIPE TENSIONER MACHINE Inventor: Ottmar Diehl, Tattaya (TH) Application number: 11/111,291, Filed on Apr. 20, 2005.
5. European Patent Application EP2192259A1 Pipeline Pressure Device With Endless Conveyor Members For Use During A Horizontal Directional Drilling Process / Published on 02.06.2010, published Gebr.van Leeuwen Harmelen B.V. 3481 MC Harmelen (NL), date of filing 12.10.2009.
6. Anishchenko VI, Zhabin AB, Averin EA, et. al. Technological Solutions for Slant Directional Drilling Project Challenges. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. International science and technology conference "Earth science"*. 2021;666:022002. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022002.
7. Oilfield Meets HDD. Offshore oil and HDD technologies merge to build undersea power link by Andrew Topf, CUI, Canadian Underground Infrastructure, September 2015.
8. Persson, B. N. J. Sliding Friction: Physical Principles and Applications. (Springer, Berlin, 2000).
9. Pruiksma JP, Pfeff D, Kruse HM. The calculation of the thrust force for pipeline installation using the Direct Pipe method. *Pipeline Technology Conference. Hanover*. 2012. Paper TM2-T5-04 – 7.
10. K. Haraniya Sing, "Hydraulic and pneumatic chapter 12", pp. 12-6 to 12-9.
11. Yuken Kogyu co. ltd, "Basic hydraulic and component", chapter 2 pp 6 – 14.
12. Popov, V. L. Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications. (Springer, Berlin, 2010).
13. Continuous Pipe Feeder for Pipeline and Tunnel Construction with a System of Avoiding Clamping against Welded Joints, provisional Patent US63/344,558 filed on 05/21/2022, inventor: Vasily Anishchenko.
14. Alfutov NA. Fundamentals of calculations for the stability of elastic systems. *Mechanical Engineering*. 1978;33:249-252.
15. Robison, J., Hotz, R., Chen, C. (2013). "Emerging Technologies – A Suggested Design Method for Jacked, Curved Steel Pipe" ASCE Pipelines Conference Proceedings pp. 864.
16. Ahemad SM. Study on basic component of hydraulic system. *International journal of trends and technology*. 2016;39(5).
17. Scaraggi M, Putignano C, Carbone G. Elastic contact of rough surfaces: A simple criterion to make 2D isotropic roughness equivalent to 1D one. *Wear*. 2013;297(1-2):811–817. DOI: 10.1016/j.wear.2012.10.004.
18. Bourgoyne, A. T, Young, F. S, Jr. Millheim, K. K, Chenevert, M. E. (2003). Applied Drilling Engineering. SPE Textbook Series, Volume 2.
19. Willoughby, David (2005). Horizontal Directional Drilling, McGraw-Hill, New York, p. 1-263.

ABOUT THE AUTHOR

Vasily Anishchenko -

PhD in Engineering (Mining Machinery) confirmed by the University of Illinois, USA, Chief Engineer at Robbins HDD, USA, e-mail: anishchenko-vas@yandex.com

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Василий Анищенко –

кандидат технических наук, главный инженер буровой компании Robbins HDD, США, e-mail: anishchenko-vas@yandex.com

ПАМЯТИ Г. В. ОРЛОВА



16 августа 2024 года после продолжительной тяжёлой болезни на 87-м году жизни скончался Геннадий Васильевич Орлов - почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, ветеран труда, кавалер орденов «Шахтёрская слава».

Г. В. Орлов родился 23 августа 1937 года в городе Щёлково Московской области. В 1955 году он окончил Монинскую среднюю школу в Московской области и в этом же году поступил в Московский горный институт (МГИ). Трудовую деятельность Геннадий Васильевич начал, еще обучаясь в МГИ. Более года он работал проходчиком на шахте в Донбассе. В 1961 году, после окончания МГИ, был распределён инженером-маркшейдером на предприятие "Ангренская станция подземгаз" Узбекской ССР.

Научная деятельность Геннадия Васильевича началась в 1962 году, с перехода на работу в институт ВНИИПРОМГАЗ и одновременной учебы в заочной аспирантуре на кафедре «Геодезии и маркшейдерского дела» МГИ. В 1965 году он успешно защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук в Московском горном институте. После защиты был назначен на должность старшего научного сотрудника ВНИИПРОМГАЗ. С 1968 по 1975 годы Г. В. Орлов работал старшим научным сотрудником Горного института Кольского филиала Академии наук СССР.

Огромный вклад Геннадий Васильевич внес в подготовку молодых инженеров горной отрасли. С 1978 по 2010 годы он работал в Московском горном институте, впоследствии в Московском государственном горном университете, доцентом, а затем профессором кафедры «Маркшейдерско-

го дела и геодезии». Участвовал в подготовке горных инженеров и аспирантов. Им проводились лекции и практические занятия по различным кафедральным дисциплинам, но больше всего его помнят по курсу "Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземной газификации углей и добыче полезных ископаемых подземным способом". Г. В. Орлов являлся научным руководителем лаборатории «Подземгаз» Московского горного института, а также активно участвовал в проведении исследований процесса сдвижения горных пород при совместной разработке рудных месторождений подземным и открытым способами. Являясь членом совета по защитах диссертаций на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, неоднократно назначался оппонентом, подготовил и лично выпустил 8 аспирантов.

Геннадием Васильевичем были подготовлены ряд учебников и учебных пособий. В 2010 году вышло учебное пособие «Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специализации «Маркшейдерское дело» по направлению подготовки «Горное дело». Геннадий Васильевич, как куратор учебных групп, много занимался воспитательной работой со студентами, помогал им справляться с возникавшими проблемами.

Геннадий Васильевич Орлов внёс существенный вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов-маркшейдеров, способных решать на горнодобывающих предприятиях задачи прогноза сдвижения горных пород и земной поверхности и обеспечивать безопасную подработку зданий, сооружений и подземных объектов.

Горная общественность, редакция журнала «Маркшейдерия и недропользование», коллеги из РАН выражают глубокие соболезнования родным, друзьям и близким Геннадия Васильевича. Вечная память!



XX-ая МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР

Ufi
Approved
Event



Mining Week

KAZAKHSTAN'2025

24-26.06.2025

[КАРАГАНДА] [КАЗАХСТАН]



ТОО «TNT EXPO»

+7 (727) 344 00 63

mintek@tntexpo.kz

mining.week.kazakhstan



MININGWEEK.KZ

СТТ ЭХРО

ОСНОВА ВАШЕГО УСПЕХА

Главная выставка строительной
техники и технологий в России

27–30 мая 2025

Крокус Экспо, Москва



Разделы выставки:

- Строительная техника и транспорт
- Производство строительных материалов
- Добыча, обогащение и транспортировка полезных ископаемых
- Запчасти и комплектующие для машин и механизмов. Смазочные материалы

Организатор

**Σ SIGMA
ЭХРО**

При поддержке

КРОКУС ЭКСПО
Международный выставочный центр



ctt-expo.ru