

0+

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

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 25, №4 Июль-Август 2025 г.

Vol. 25, №4 July-August 2025

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

www.n-gn.ru

С Днем шахтера!

Шахтеры – гвардия труда! –
И в знойный день, и в непогоду
Дают бесценно на гора
Угля тепло – все для народа!

Трудами вашими всегда
Задачи сложные решатся –
Надежность, крепость, героизм –
Синонимы шахтеров братства!

Уважаемые коллеги!

В последнее время мне часто приходится общаться с руководителями горных компаний, работниками маркшейдерских служб, производственно-технических подразделений горных предприятий и другими специалистами, занимающимися вопросами, геологического, маркшейдерского и научно-технического обеспечения функционирования горного производства. Многие из них отмечают явные противоречия между уровнем ответственности административной подчиненности и функциональных обязанностей маркшейдерской службы, а также разрозненность в действиях и зонах ответственности маркшейдерской, геомеханической и геотехнической служб предприятия.

Исторически главный маркшейдер призван обеспечивать качество и безопасность освоения недр в интересах государства. В этом отношении он, безусловно, является государственным лицом и должен подчиняться только генеральному директору предприятия, несущему полную ответственность за качество освоения лицензионного участка недр. В современных реалиях служба главного маркшейдера находится в прямом подчинении главного инженера (технического директора) предприятия, при этом на крупных горных предприятиях функционируют ещё геомеханические и геотехнические службы.

Вместе с тем, условия взаимодействия маркшейдерской и геомеханической служб на сегодняшний день не определены. Согласно действующему законодательству, лицом, наделенным государством ответственностью за качество и безопасность освоения месторождения, является главный маркшейдер, имеющий соответствующую лицензию. Требования к геомеханической службе не предполагают наличия специального образования, стажа работы и возложения какой-либо ответственности и обязательств перед маркшейдерской службой и, соответственно, государством. Получается, что геомеханическая служба функционирует сама по себе, развивается по своим законам и ее предложения носят исключительно рекомендательный характер. Здесь важно отметить, что устойчивый тренд на усложнение условий отработки месторождений требует более основательной и детальной прогнозной оценки состояния массива горных пород, которую невозможно обеспечить только маркшейдерскими замерами. Требуется более широкая база экспериментальных исследований, программирования, геомеханического прогнозирования с подготовкой специалистов соответствующего профиля.

Это предполагает решение на государственном уровне вопросов образования, функционального, правового, структурного, ведомственного подчинения и регулирования.

Прошу поделиться Вашим мнением по обозначенной выше проблеме специалистов в области маркшейдерского дела, геомеханики и геологического обеспечения горных работ.

Будем благодарны за предоставление материалов для обсуждения с горной общественностью на страницах нашего журнала с выдачей рекомендаций по совершенствованию решения правовых вопросов в этой сфере недропользования.



Главный редактор журнала
«Маркшейдерия и недропользование»,
проф., докт. техн. наук
Юрий Витальевич ДМИТРАК

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Научно-технический и производственный журнал



Т. 25, № 4
Июль-Август 2025 г.

Журнал издается с 2001 года

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Общество с ограниченной

ответственностью «Издательский дом

«Недропользование и горные науки»



РЕДАКЦИЯ:

Заместитель главного редактора **В. Н. Хетагуров**

Ведущий редактор **Н. А. Федотенко**

Ученый секретарь **Н. А. Милетенко**

Помощник главного редактора **Б. Н. Пашичев**

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ:

117647, ул. Академика Капицы, д. 26, 1.

Тел.: +7(915) 111 0386

E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru http: //www.n-gn.ru

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

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

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

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

В течение года можно произвести подписку на журнал
непосредственно в редакции

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

При перепечатке ссылка на журнал

«Маркшейдерия и недропользование» обязательна

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

Тираж 1000 экз.

Свободная цена.

Дата выхода в свет: 01.09.2025

ISSN 2079-3332



24 003



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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. А. Барях – академик РАН, д.т.н., проф., руководитель научного направления «Горные науки» центра, 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. Трубецкой – академик РАН, д.т.н., проф., советник президиума РАН, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

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

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

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Scientific, Technological and Production Journal



Vol. 25, № 4
July-August 2025

journal has been published since 2001



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

EDITORIAL OFFICE:

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

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE AND PUBLISHER:

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

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

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

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

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

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

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

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

127018, Moscow
phone: +7(929)982-72-82
Covering - 1000 copies.
Free price.
Release date: 01.09.2025

ISSN 2079-3332



24 003



9 772079 333778



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

EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

Alexander A. Baryakh - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the scientific direction Mining Sciences of the center, Mining Institute, Ural Branch, RAS, Perm, Russian Federation

Vladimir I. Golik - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Mining Department, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Victor 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. Khoreshok - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Mining Institute, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Yongjun Yang - Ass. Professor, School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, China

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Поздравление редакции с Днем шахтера	5	Congratulations from the editors on Miner's Day
НАШИ ЮБИЛЯРЫ		OUR ANNIVERSARIES
Поздравляем с юбилеем	6	Congratulations to Marina Vladimirovna Rylnikova on her anniversary!
Марину Владимировну Рыльникову!	7	85 years old – Marat Zhakupovich Bitimbaev
85 лет – Марату Жакуповичу Битимбаеву		GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ		<i>V. E. Kislyakov, P. V. Katyshev, Ya. E. Linkov, N. A. Kaidash, D. A. Pokatsky</i>
<i>В. Е. Кисляков, П. В. Катышев, Я. Е. Линьков, Н. А. Кайдаш, Д. А. Покацкий</i>	9	Revealing the relationship between seawater density and the depth of Russia's arctic seas in the context of solid mineral extraction
Раскрытие взаимосвязи между плотностью морской воды и глубиной арктических морей России в контексте добычи твердых полезных ископаемых		<i>A. A. Kravtsov, V. A. Atrushkevich</i>
<i>А. А. Кравцов, В. А. Атрушкевич</i>	16	Analysis of coal dewatering technologies for underground mining applications
Анализ технологий сушки угля для их применения в подземной гидродобыче		<i>V. D. Kantemirov, A. M. Yakovlev, R. S. Titov</i>
<i>В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов</i>	23	Methodology for assessing the mining conditions of quarrying to find reserves to increase the intensity of mining operations
Методика оценки горнотехнических условий отработки карьеров для изыскания резервов повышения интенсивности горных работ		<i>A. V. Matveev</i>
<i>А. В. Матвеев</i>	31	Parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels for Kuzbass sections
Параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат для разрезов Кузбасса		<i>A. A. Koryakin</i>
<i>А. А. Корякин</i>	41	Substantiation of the parameters of the technology of purification of silo accumulators of coal-processing plants by hydraulic elevator dredgers
Обоснование параметров технологии очистки илонакопителей углеобогажительных фабрик гидроэлеваторными земснарядами		THEORETICAL BASIS FOR DESIGNING MINING SYSTEMS
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ		<i>V. E. Kislyakov, A. S. Fedotov, D. S. Snetkov, A. V. Shwartzkopf</i>
<i>В. Е. Кисляков, А. С. Федотов, Д. С. Снетков, А. В. Шварцкопф</i>	47	Tudy of spatial variability of quality indicators of the Bolshesyrskoye lignite coal deposit
Исследование пространственной изменчивости горно-геологических условий и показателей качества полезного ископаемого Большесырского бурого угольного месторождения		GEOLOGY, EXPLORATION, AND EXPLOITATION OF OIL AND GAS FIELDS
ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ		<i>M. G. Efimov, A. R. Mukhutdinov</i>
<i>М. Г. Ефимов, А. Р. Мухутдинов</i>	53	Neural network optimization of mixed solid fuel compositions to improve the economic efficiency of thermo-hydrodynamic impact on oil reservoirs
Нейросетевая оптимизация составов смесевых твердых топлив для повышения экономической эффективности термогидродинамического воздействия на нефтяные коллекторы		MINERAL RESOURCES
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ		<i>Yu. V. Dmitrak, V. I. Golik</i>
<i>Ю. В. Дмитрак, В. И. Голик</i>	59	Towards the concept of crushing and grinding of mineral raw materials in mills
К концепции дробления и измельчения минерального сырья в мельницах		SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS
МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ		<i>P. V. Volkov, I. A. Pytalev, K. I. Strukov, R. V. Kulsaitov, R. I. Bikbov</i>
<i>П. В. Волков, И. А. Пыталев, К. И. Струков, Р. В. Кульсаитов, Р. И. Бикбов</i>	65	Technological solutions and designs of safety devices in shaft sinking operations
Технологические решения и конструкции предохранительных устройств при углубке шахтных стволов		

<i>Б. Н. Бухтояров, О. Р. Старикова, В. Г. Петров, Д. В. Кудин, А. А. Виноградова</i>			
Геоманнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин		71	<i>B. N. Bukhtoyarov, O. R. Starikova, V. G. Petrov, D. V. Kudin, A. A. Vinogradova</i>
<i>И. М. Величко</i>			
Проведение маркшейдерских работ с использованием радарной интерферометрии для выявления подземных пожаров при разработке угля шахтным способом		83	<i>I. M. Velichko</i> Conducting mine surveying using radar interferometry to detect underground fires during coal mining
ГЕОЭКОЛОГИЯ			GEOECOLOGY
<i>К. А. Воробьев, Е. В. Колодежная</i>			<i>K. A. Vorobyev, E. V. Kolodezhnaya</i>
Оценка эколого-гигиенических аспектов утилизации продуктов термической обработки твердых коммунальных отходов		88	Assessment of the environmental and hygienic aspects of thermal treatment waste disposal from municipal solid waste
<i>И. А. Архипов</i>			<i>I. A. Arhipov</i>
Оценка концентрации метана при добыче угля на разрезах, работающих в метановой зоне		95	Estimation of methane concentration during coal mining at coal mines operating in the methane zone
НЕКРОЛОГИ			OBITUARIES
Памяти В. А. Гордеева		103	In memory of V. A. Gordeev

ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ, УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ НАШЕГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА!

ОТ ВСЕЙ ДУШИ ПОЗДРАВЛЯЕМ ВАС С ГЛАВНЫМ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМ ПРАЗДНИКОМ ГОРНЯКОВ – ДНЕМ ШАХТЕРА!

Шахтер – одна из самых тяжелых и сложных, но важных для страны профессий, без которой не может обойтись металлургическая, химическая промышленность, энергетика. Поэтому День шахтера – это праздник, который стал символом признания тяжелого труда людей, ежедневно рискующих жизнями во время добычи угля и других полезных ископаемых из недр земли. В этот день мы говорим слова признательности и благодарности всем, кто связан с этой профессией. Ваш труд – символ невероятного мужества и самоотверженности. Вы, как никто другой, умеете находить свет в самых темных уголках земли. В истории отечественной промышленности горняцкий труд всегда был символом надежности, мужества и самоотдачи. Сегодня, когда мировые вызовы и высокие темпы технологических перемен ставят новую планку перед угольной отраслью, именно вы, проходчики и взрывники, горнорабочие очистных забоев и машинисты подъемных установок, маркшейдеры, инженеры-геомеханики, специалисты по цифровым шахтным системам, ежедневно подтверждаете высокое звание шахтера делом, а не словом. Благодаря вашей стойкости и профессионализму российская энергетика остается стабильной, металлургия и химическая промышленность получают стратегическое сырье, а тысячи городов уверены в тепле и свете.

Наш журнал не только фиксирует достижения отрасли на полосах, но и старается быть верным более четверти века вашим планам, открытиям и сложным производственным задачам. Мы вместе освещаем опыт внедрения беспилотного транспорта на разрезах, развитие высокопрочной

крепи, применение искусственного интеллекта в системах прогнозтики газодинамических явлений, информационной безопасности горных предприятий. Каждая опубликованная работа, каждая исследовательская статья – это шаг к повышению безопасности, эффективности и экологичности горных работ, а значит, к воплощению мечты о современной безопасной шахте.

Сегодня отрасль переживает непростой период: меняются мировые рынки, возрастает роль «зеленой» повестки, ужесточаются требования к углеродному следу продукции.

Однако принятые государством меры поддержки, инвестпроекты по глубокой переработке угля, переход на безлюдные технологии добычи и закладку пустот, масштабное обновление парка горнотранспортного оборудования вселяют уверенность: угледобыча сохранит лидирующие позиции в экономике страны и превратится в отрасль будущего.

Дорогие друзья, желаем вам крепкого здоровья, счастья и семейного благополучия, гордости от полученных результатов. Желаем, чтобы каждый спуск под землю завершался удачным подъемом, чтобы в домах царили спокойствие и радость, а ваша нелегкая работа по-прежнему служила опорой развития России.

С праздником, с Днем шахтера!

**Редакция и коллектив
научно-технического
и производственного журнала
«Маркшейдерия и
недропользование»**



Уважаемая Марина Владимировна!

Примите самые искренние поздравления со знаменательным юбилеем!

Ваш выдающийся путь в науке и образовании является примером бескорыстного служения Отечеству, высоким идеалам профессионализма и научного поиска. Ваша деятельность на протяжении десятилетий неразрывно связана с решением важнейших государственных задач в сфере рационального освоения недр и развития минерально-сырьевой базы страны, подготовкой кадров высшей квалификации для горной отрасли.

Благодаря Вашему высокому профессионализму, целеустремленности и настойчивости были существенно развиты и обогащены научно-методические и технологические подходы к комплексному освоению месторождений твердых полезных ископаемых. Возглавляя отдел теории проектирования освоения недр Института проблем комплексного освоения недр РАН, Вы внесли значимый вклад в совершенствование новых направлений в науке о недропользовании, а также в разработку и внедрение комбинированных геотехнологий, обеспечивающих эффективную и экологически сбалансированную добычу минеральных ресурсов.

Ваши научные труды, получившие признание как в России, так и за рубежом, служат ориентиром для многих поколений исследователей и инженеров. Разработанные Вами рекомендации успешно внедрены на крупнейших горнодобывающих предприятиях страны, что способствовало не только повышению технологической эффективности, но и решению значимых вопросов экологической безопасности.

Особого уважения заслуживает Ваш вклад в подготовку научных и инженерных кадров. Под Вашим руководством защитили диссертации десятки докторов и кандидатов наук, сотни молодых специалистов получили необходимые знания и опыт для успешной работы в горной промышленности. Вы неизменно поддерживаете высокий уровень научного и педагогического наставничества, формируя профессиональное сообщество, способное решать сложнейшие задачи современного производства.

Ваши заслуги отмечены высокими государственными наградами, в том числе двумя премиями Правительства Российской Федерации в области науки и техники. Вы являетесь признанным экспертом в вопросах стратегического развития отрасли, активным участником формирования научно-технической политики, авторитетным членом ведущих научных и экспертных советов.

В этот праздничный день позвольте выразить Вам слова глубокого уважения и признательности за Ваш труд, верность избранному делу, за огромный вклад в развитие отечественной науки, образования и промышленности.

Желаю Вам крепкого здоровья, бодрости духа, новых творческих успехов, благополучия и счастья! Пусть реализуются все замыслы, а Ваша энергия и энтузиазм служат на благо нашей страны и её будущего!

С уважением,

С наилучшими пожеланиями



**профессор, доктор технических наук,
главный редактор научно-технического
и производственного журнала
«Маркшейдерия и недропользование»
Юрий Витальевич Дмитрак.**

команда журнала «Маркшейдерия и недропользование»

ЮБИЛЕЙ МАРАТА ЖАКУПОВИЧА БИТИМБАЕВА

Марат Жакупович Битимбаев – выдающийся ученый Республики Казахстан, специалист в области горных наук отмечает 85-летний юбилей. Доктор технических наук, профессор, заслуженный геолог Республики Казахстан. Основные направления исследований: «Создание физико-технической и физико-химической геотехнологических систем созидательного освоения недр», «Технологическое обеспечение устойчивости выработанного пространства».

18 августа исполнилось 85 лет горному инженеру, доктору технических наук, профессору, академику Национальной инженерной академии Республики Казахстан, Академии минеральных ресурсов Республики Казахстан и академик-у Международной инженерной академии.

Марат Жакупович родился в 1940 году в городе Зайсан Восточно-Казахстанской области. В 1962 году окончил Казахский политехнический институт.

В 1975 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (по теме «Установление оптимальных соотношений погружно-доставочных комплексов и технологических схем их применения при разработке месторождений с использованием самоходного оборудования (на примере Миргалымсайского месторождения)»).

В 1977 году за выдающийся уровень проектирования и строительство рудника «Глубокий» в сложных гидрогеологических условиях с притоками воды в подземных горных выработках до 20–25 тыс/час на глубине 500–800 м с применением передовой техники и технологии ему присуждена премия Совета министров СССР.

В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по теме «Технология выемки руды из целиков при повторной разработке обширных пластообразных рудных залежей с устойчивой кровлей».

Важные вехи научно-производственной деятельности М. Ж. Битимбаева:

- создание и внедрение впервые в мире технологии тиксотропной (пастовой) закладки на производстве на Миргалымсайском месторождении в 1980–1989 годах (в соавторстве);
- реализация научно-технологической программы «Золото Казахстана» в 2011–2014 годах (в соавторстве);
- подготовка технико-экономических расчетов (ТЭР) с одобрением их руководством ТОО «Корпорация «Казахмыс» (переработки отвалов сульфидных руд рудника «Саяк» и добытых сульфидных руд рудника «Шатыркуль» с применением новой технологии рентгенорадиометрической сепарации (РРС) в 2016 году; оптимизации транспортных затрат и объемов переработки руды на Карагайлинской и Балхашской обогатительной фабриках со строительством собственной обогатительной фабрики для месторождений Акбастау, Кусмурын, Мизек и освоением новых месторождений вблизи действующих фабрик; экономической эффективности перехода на открытый способ разработки месторождений Аксу, Бестобе, Жолымбет, Кварцитовые Горки АО «Казахалтын» в 2018 году) и мн. др.

Важными направлениями деятельности юбиляра в области фундаментальных исследований горных наук стали следующие значимые исследования:

- «Комплексное дуальное управление совокупным решением освоения недр и сохранения качественной природной среды для обеспечения устойчивого развития в формате нулевого вреда и нулевых отходов», названное М. Ж. Битимбаевым «созидательным освоением недр» в качестве нового научного понятия;
- «Создание физико-технической и физико-химической геотехнологических систем созидательного освоения недр, позволяющих обеспечить производство металлов в совокупности с циркулярной экономикой в ресурсосберегающем и ресурсовоспроизводящем формате, сформулированном академиком РАН К. Н. Трубецким»;
- «Технологические схемы и технико-экономическое обоснование нового способа отработки месторождений полезных ископаемых с методом развития подземных горных работ по выемке руды «снизу вверх» (способ развития горных работ предложен впервые в мировой практике);
- «Создание технологической схемы и конструкции ее исполнения на основе физико-химической геотехнологии подземного скважинного выщелачивания металлов с полным освоением традиционного рудного тела, забалансовых запасов, ресурсов во вмещающих породах и в пределах экономически эффективного минимального промышленного содержания из геохимических ореолов и барьеров» (впервые в мировой практике);
- «Новые варианты системы разработки с выемкой слоевыми камерами восходящим способом и твердеющей закладкой, обеспечивающие добычу руды с нулевыми потерями в недрах».

М. Ж. Битимбаев подготовил и издал единственные в Республике Казахстан терминологические словари по тематике «Горное дело и металлургия» одновременно на казахском, русском и английском языках (в соавторстве). Под его руководством подготовлены и изданы единственные в стране историко-познавательные монографии «История цветной металлургии Казахстана», 2012 год; «История, выкованная медью» (на казахском, русском и английском языках), повествующая о созда-



нии, жизнедеятельности и перспективах развития ТОО «Корпорация «Казахмыс», 2018 год; «Ачисайский полиметаллический комбинат (история, события, люди)», 2018 год.

М. Ж. Битимбаев – автор 174 научных работ, в том числе 155 научных статей, 16 монографий, 3 учебников для вузов, а также автор 83 авторских свидетельств СССР на изобретения, первое из которых появилось еще в 1968 году. За время существования Республики Казахстан он получил 42 патента своей страны и патент РФ. Научные открытия М. Ж. Битимбаева были отмечены серебряной медалью Российской академии естественных наук имени лауреата Нобелевской премии Петра Капицы в 2025 году.

Профессиональная научная, производственная и общественная деятельность М. Ж. Битимбаева отмечена высокими государственными и ведомственными наградами: орденом «Знак Почета», «Курмет», «Парасат», Почетной грамотой Верховного Совета Казахской ССР, многочисленными медалями СССР и Республики Казахстан, орденом «Инженерная слава» (высшая награда Высшего инженерного совета РФ), почетным знаком «Шахтерская слава» всех трех степеней, золотыми медалями «Лучшего выпускника КазНТУ им. К. И. Сатпаева» и «За выдающийся вклад в развитие современного высшего образования и достижения в воспитании талантливых специалистов в геологической и горно-металлургической отраслях», а в 2025 году – государственной наградой «Заслуженный геолог Республики Казахстан» и мн. др.

М. Ж. Битимбаев – почетный гражданин своей малой родины – Зайсанского района Восточно-Казахстанской области, где он известен благотворительной деятельностью. В 2014 году избран почетным профессором КазНТУ имени К. И. Сатпаева.

Коллектив и редколлегия журнала «Маркшейдерия и недропользование», сотрудничая на протяжении многих лет с М. Ж. Битимбаевым как с профессионалом высочайшего уровня, ценят также его невероятное дружелюбие, умение быть конструктивным в решении любых вопросов, как верного друга нашей общей культуры и великого нашего прошлого, которое воплощается в нынешних совместных взглядах на наше уверенное и счастливое будущее.

Мы сердечно поздравляем Марата Жакуповича с юбилеем и желаем ему доброго здоровья, счастья, семейного благополучия, сохранять присущие ему оптимизм и позитивное отношение в решении любых вопросов, новых творческих достижений на благо дальнейшего развития науки и горно-металлургической отрасли!

РАСКРЫТИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПЛОТНОСТЬЮ МОРСКОЙ ВОДЫ И ГЛУБИНОЙ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В КОНТЕКСТЕ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В. Е. Кисляков¹, П. В. Катышев¹, Я. Е. Линьков^{1✉}, Н. А. Кайдаш², Д. А. Покацкий¹

¹ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

²ООО «НТЦ «Геотехнология», г. Красноярск, Российская Федерация

✉ flash198@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены актуальные вопросы освоения минеральных ресурсов арктического шельфа России с применением инновационных автономных добычных комплексов. Особое внимание уделено исследованию взаимосвязи плотности морской воды с глубиной как ключевым фактором, влияющим на эффективность работы подводного оборудования. Авторами предложено оригинальное техническое решение – автономный добычный комплекс, использующий энергию сжатого газа для добычи, обогащения и транспортировки полезных ископаемых. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать подъемную силу автономного добычного комплекса с учетом изменения плотности воды на различных глубинах. Практическая значимость исследования заключается в обосновании выбора рабочего газа для автономного добычного комплекса и создании расчетных моделей, применимых при проектировании подводных горных работ. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации технологий освоения минеральных ресурсов Арктики.

Ключевые слова: арктический шельф, автономные добычные комплексы, плотность морской воды, математическое моделирование, подъемная сила, глубоководная добыча

Благодарности, признательность: Авторы посвящают эту статью памяти соавтора и руководителя В. Е. Кислякова.

Для цитирования: Кисляков ВЕ, Катышев ПВ, Линьков ЯЕ, Кайдаш НА, Покацкий ДА. Раскрытие взаимосвязи между плотностью морской воды и глубиной арктических морей России в контексте добычи твердых полезных ископаемых. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):9-15. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-9-15>.

REVEALING THE RELATIONSHIP BETWEEN SEAWATER DENSITY AND THE DEPTH OF RUSSIA'S ARCTIC SEAS IN THE CONTEXT OF SOLID MINERAL EXTRACTION

V. E. Kislyakov¹, P. V. Katyshev¹, Ya. E. Linkov^{1✉}, N. A. Kaidash², D. A. Pokatsky¹

¹Siberian Federal University, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education,

Krasnoyarsk, Russian Federation

²LLC "NTC "Geotechnologiya", Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ flash198@mail.ru

Abstract: The article deals with topical issues of mineral resources development on the Arctic shelf of Russia using innovative autonomous mining complexes. Special attention is paid to the study of the relationship between sea water density and depth as a key factor affecting the efficiency of subsea equipment. The authors proposed an original technical solution - an autonomous mining complex using compressed gas energy for extraction, processing and transportation of minerals. A mathematical model has been developed that allows to calculate the lifting force of the autonomous mining complex taking into account changes in water density at different depths. The practical significance of the study lies in the justification of the choice of working gas for an autonomous mining complex and the creation of calculation models applicable to the design of underwater mining operations. The results of the work can be used to optimize technologies for the development of mineral resources in the Arctic.

Keywords: Arctic shelf, autonomous production complexes, sea water density, mathematical modeling, lifting force, deep-sea production

Acknowledgments, funding: The authors dedicate this article to the memory of their co-author and supervisor, V. E. Kislyakov.

For citation: Kislyakov VE, Katyshev PV, Linkov YaE, Kaidash NA, Pokatsky DA. Revealing the relationship between seawater density and the depth of Russia's arctic seas in the context of solid mineral extraction. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):9-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-9-15>.

Введение

Освоение ресурсов Арктики становится все более актуальной задачей в условиях роста потребности в минеральном сырье. Особое внимание привлекают морские месторождения твердых полезных ископаемых, расположенные на арктическом шельфе. Однако их эффективная разработка невозможна без принципиально новых технических решений. Оборудование должно выполнять работы в суровых условиях арктического шельфа с его сложными гидрогеологическими и природно-климатическими условиями [1–5]. Разработка и внедрение такого оборудования неизбежно повлечет за собой необходимость создания новых или модернизацию существующих технологий добычи полезных ископаемых в морских условиях.

В современный период арктический шельф России превратился в ключевой полигон для разработки и испытания перспективных технологий глубоководной добычи, включая кассетные тралы и различные системы глубоководного гидроподъема [6–7]. Эти технологии имеют глубокую проработку и широко известны ученым и исследователям. Однако современная горнодобывающая отрасль не стоит на месте и активно развивает направление автономных добычных комплексов, что обусловлено стремлением к повышению эффективности, безопасности и снижению зависимости от человеческого фактора [8–10].

Одним из ключевых параметров, определяющих структуру водных масс, динамику подводных процессов и работу автономных добычных комплексов, является плотность морской воды. Она зависит от множества факторов, включая температуру, соленость и глубину, что приводит к формированию плотностного расслоения. В арктических морях, где климатические условия резко меняются, эти характеристики особенно важны для оценки устойчивости подводных конструкций и работы подводных комплексов для добычи.

В связи с тем что технология автономных добычных комплексов становится все более популярной, исследователям требуется глубокое понимание физико-химических свойств морской среды, в частности взаимосвязи плотности воды и глубины предполагаемого месторождения.

С учетом вышеизложенного настоящая работа направлена на изучение закономерностей изменения плотности морской воды с глубиной в арктических морях России. В статье предлагается техническое решение по применению автономного добычного комплекса, использующего энергию сжатого газа для добычи, предварительного обогащения полезного ископаемого и транспортирования полученного концентрата на поверхность акватории.

Цель исследования: изучение взаимосвязи плотности морской воды и глубины арктических морей в контексте применения автономных добычных комплексов, что позволит создать математическую модель, предназначенную для расчета подъемной силы и времени цикла.

Методы исследований

Предлагаемый авторами автономный добычный комплекс (далее – АДК) представлен на рисунке 1. Он пред-

ставляет собой добычное устройство, производящее попутное обогащение полезного ископаемого в призабойном пространстве.

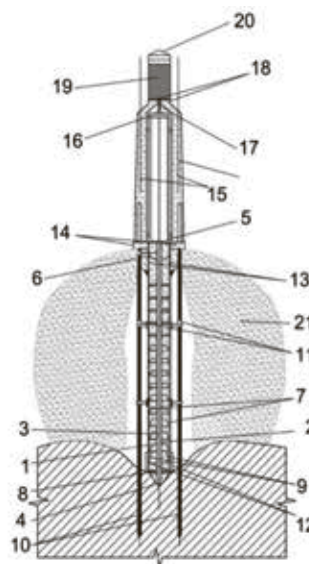


Рис. 1. Устройство для добычи полезных ископаемых со дна континентального шельфа: 1 – подъемная труба; 2 – газопровод; 3 – смеситель; 4 – струйный распылитель; 5 – баллон высокого давления; 6 – задвижка-редуктор; 7 – рифли; 8 – ограничительная насадка; 9 – лепестковый клапан; 10 – штанги-направляющие; 11 – фрикционные замедлители; 12 – кумулятивные заряды; 13 – выпускные окна; 14 – пластинчатые заслонки; 15 – газонаправляющие трубы; 16 – такелажное кольцо; 17 – подвес купола; 18 – пружины фиксации; 19 – купол; 20 – такелажная скоба; 21 – взвешенные частицы грунта / **Fig. 1. A device for extracting minerals from the bottom of the continental shelf:** 1 – lifting pipe; 2 – gas pipeline; 3 – mixer; 4 – jet sprayer; 5 – high-pressure cylinder; 6 – gate valve-reducer; 7 – raffles (for mineral processing); 8 – restrictor nozzle; 9 – flapper valve; 10 – guide rods; 11 – friction dampers; 12 – shaped charges; 13 – discharge ports; 14 – plate shutters; 15 – gas guide pipes; 16 – lifting eye; 17 – canopy suspension; 18 – retaining springs; 19 – canopy; 20 – shackle (for rigging); 21 – suspended ground particles

АДК опускается на дно шельфа, где под действием силы тяжести внедряется в грунт. Через струйный распылитель, находящийся на конце устройства, подается газ под высоким давлением, который разрыхляет донные отложения, создавая пульпу, которая увлекается восходящим потоком газа в подъемную трубу. В трубе располагаются рифли таким образом, чтобы живое сечение потока увеличивалось по длине подъема, при этом скорость потока снижалась. Благодаря этому замедленные тяжелые частицы полезного ископаемого оседают в углублении рифлей, а пустая порода удаляется через выпускные окна. Высвободившийся газ улавливается в гибкий купол, после наполнения которого срабатывают кумулятивные заряды, дающие энергию для отрыва устройства от дна. Газ от взрыва направляется в купол, тем самым образуется дополнительная подъемная сила, транспортирующая на поверхность комплекс с концентратом полезного компонента [11].

Особенностью технологического процесса при использовании предложенного автономного добычного комплекса

является автономность с момента спуска в воду и до непосредственного всплытия на поверхность акватории. Второй немаловажной особенностью является совмещение процессов добычи и обогащения. Энергией на все эти процессы, включая процесс всплытия, является сжатый газ. Это позволяет добиться высокого уровня энергоэффективности при ведении добычных работ.

Принцип работы рассматриваемых АДК представлен на рисунке 2.

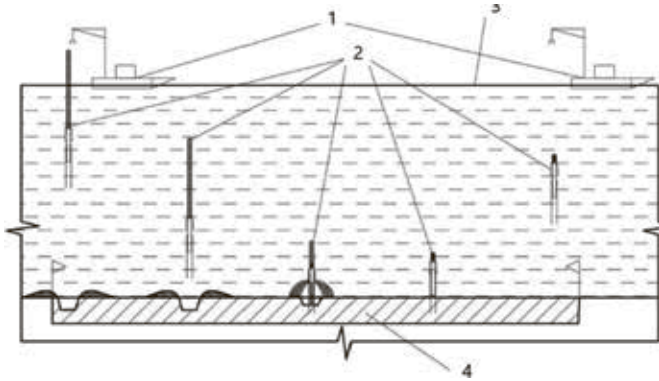


Рис. 2. Технология применения устройства для добычи полезных ископаемых со дна континентального шельфа: 1 – добычное судно; 2 – АДК; 3 – поверхность воды; 4 – продуктивный участок дна /
Fig. 2. Technology of application of the device for extraction of minerals from the bottom of the continental shelf: 1 – Mining vessel; 2 – AMS (Autonomous Mining System); 3 – Water surface; 4 – Productive seabed horizon

Технология применения устройства заключается в том, что с проходящего судна, используя кран-манипулятор 1, спускается на воду 3 АДК 2. Под действием силы тяжести он опускается на продуктивный участок дна 4, внедряясь в него. В результате чего срабатывает механика, открывается задвижка и рабочий газ устремляется вверх. Восходящий поток воды захватывает частицы грунта со дна и увлекает их в подъемную трубу. В подъемной трубе происходит процесс обогащения с осаждением полезного ископаемого в рифли. Пустые породы удаляются из трубы, а рабочий газ начинает расправлять купол.

Когда рабочий газ перестает поступать, детонируюткумулятивные заряды, энергия взрыва от которых отделяет комплекс ото дна 4. За счет созданной подъемной силы рабочим газом в куполе АДК 2 начинается всплытие на поверхность. Особая, вытянутая форма купола будет позволять АДК 2 находиться на поверхности акватории во взвешенном состоянии до момента, пока его не вытащит на палубу судно-сборщик 1.

Подъемная сила, необходимая для подъема устройства с морского дна на поверхность, определяется взаимодействием сил тяжести и выталкивающей силы, которая создается в том числе за счет использования газов. Для оценки этой силы необходимо учитывать физические параметры газов (плотность, объем, давление) и влияние гидростатического давления, которое возрастает с глубиной.

Используя уравнение состояния идеального газа и закон Бойля – Мариотта (Гей-Люссака), авторами получена зависимость по определению подъемной силы, создаваемой газом в замкнутом пространстве, доставленном на глубину с поверхности морской акватории.

Подъемная сила газа (F , кгс):

$$F = \frac{(\rho_{\text{вод}} - \rho_2) \cdot g \cdot V_1 \cdot P_1 \cdot T_2}{P_2 \cdot T_1} \cdot 0,101, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{вод}}$ – плотность морской воды, кг/м³; ρ_2 – плотность газа, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; V_1 – начальный объем газа, м³; T_1 – температура воды на глубине забоя, К; T_2 – температура на поверхности акватории, К; P_2 – абсолютное давление на глубине забоя, Па; P_1 – атмосферное давление, Па.

В данном исследовании использовались среднемесячные показатели плотности морской воды, по информации об обстановке в мировом океане (ЕСИМО) для пяти арктических морей, омывающих берега России: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского [12–16]. Статистические данные были заранее обработаны авторами атласа «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана». Стандартная ошибка среднего значения не выходила за рамки типовой, благодаря чему собранные данные считаются удобоваримыми.

Расчет данных береговых гидрометеостанций составителями атласа производился согласно месячным рядам четырех срочных прибрежных данных за все время наблюдений.

В условиях океанографических станций вековых разрезов вычисления были проведены по рядам данных, составленных по наблюдениям в постоянных точках морей за весь временной промежуток.

В случае акватории открытого моря основные статистические характеристики были определены по данным глубоководных наблюдений, сформированным по одноградусным квадратам Марсдена за все время наблюдений.

Непосредственные исследования выполнялись, опираясь на зависимости средних арифметических значений, которые стандартно определялись как сумма всех значений, деленная на их количество.

На портале межведомственной федеральной системы значения плотности находились в условных единицах. Для удобства проведения исследования плотность была переведена в истинные единицы, используя стандартные методики с учетом сложения с чистой водой в стандартных условиях. Это позволит правильно интерпретировать результаты.

Результаты и обсуждение

Согласно проанализированным данным для Баренцева моря, был построен график изменения плотности в течение года на различных горизонтах, так как это самая изученная акватория по всем горизонтам (рис. 3).

График иллюстрирует постепенное увеличение плотности морской воды с увеличением глубины, это объясняется снижением температуры и увеличением солёности.

Стоит отметить, что сезонные изменения плотности на горизонтах свыше 150 м незначительны и изменяются в границах 0,01 %, что показывает стабилизацию плотностной структуры в глубоководных слоях. Это важно при моделировании подъемных систем автономного добычного комплекса, так как их настройки не нуждаются в корректировке в течение года и могут применяться в любой период года. В случае постоянных плотностных характеристик морской воды на данных глубинах подъемное усилие должно рассчитываться для работы конкретно в данных стабильных условиях.

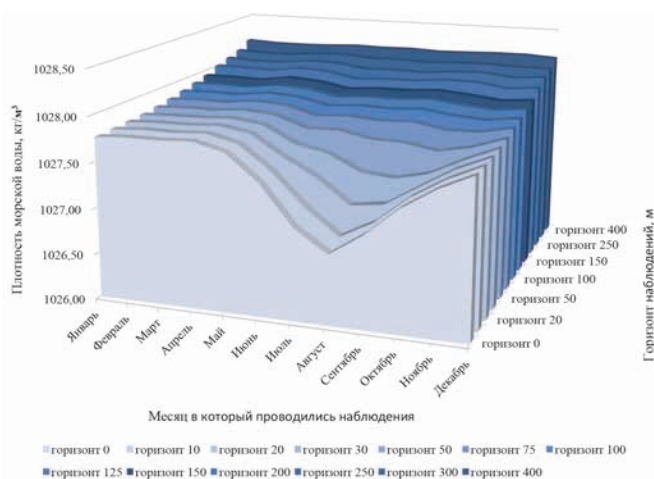


Рис. 3. Изменения плотности морской воды в течение года на разных горизонтах (на примере Баренцева моря) / Fig. 3. Changes in seawater density during the year at different horizons (on the example of the Barents Sea)

Первый этап анализа заключался в рассмотрении зависимости плотности от глубины каждого из морей арктической

зоны в отдельности. Значения плотности на одноименных горизонтах среднемесячных значений параметра в году усреднялись по каждой из акваторий.

Усредненные значения плотности использовались для построения графиков зависимости плотности от глубины (рис. 4).

Полученные данные были аппроксимированы к степенной регрессии. Вследствие чего получено эмпирическое уравнение, описывающее изменение плотности морской воды от глубины. Уравнение плотности морской воды имеет следующий вид, кг/м³:

$$y = a \cdot x^b, \quad (2)$$

где x – глубина измерения, м; a , b – эмпирические коэффициенты.

По результатам регрессионного анализа получены следующие значения коэффициентов для данного уравнения (табл. 1).

Чтобы оценить качество регрессионной модели, произведен расчет коэффициента детерминации. По результатам расчета получены значения, приведенные в таблице 2.

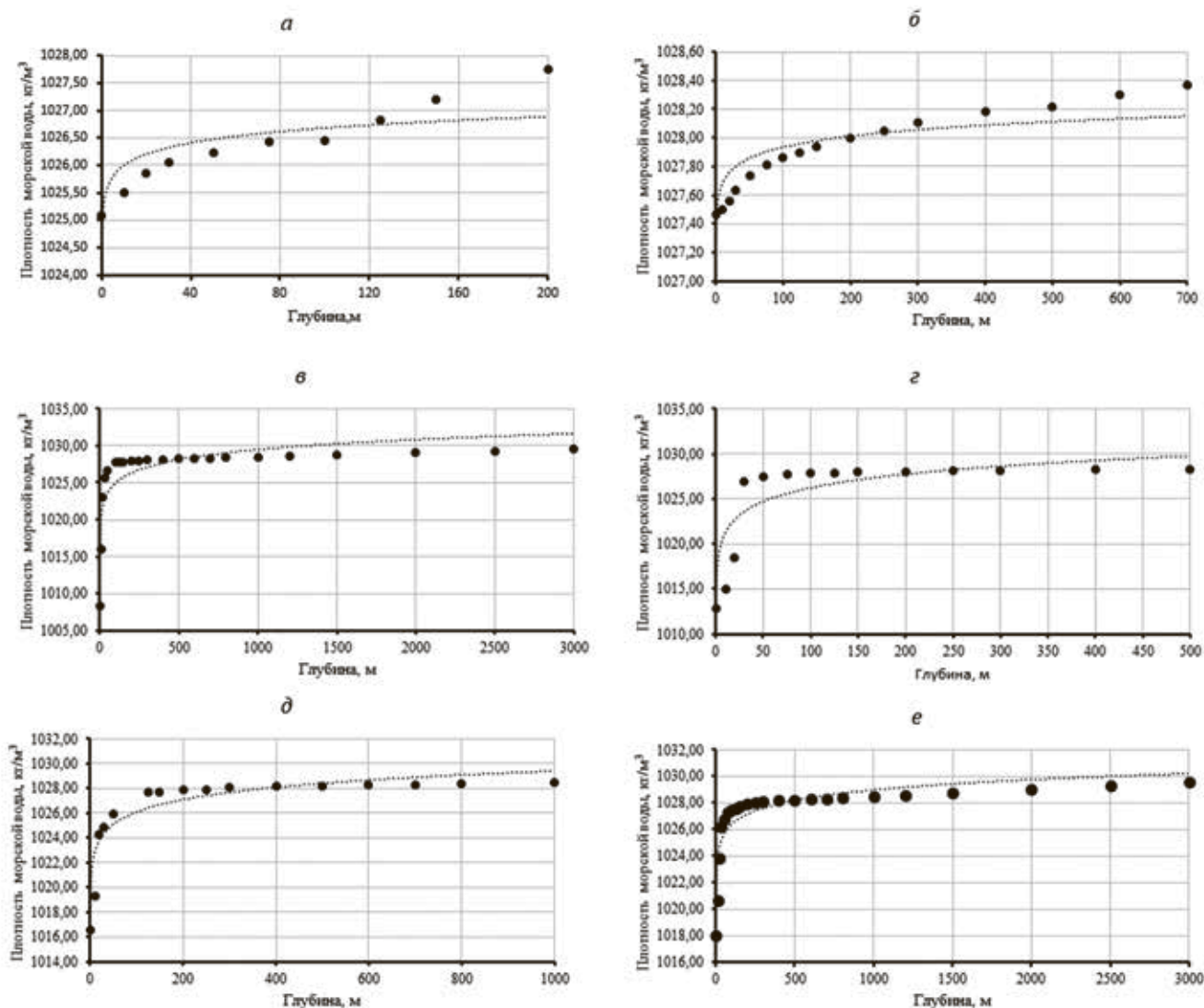


Рис. 4. Распределение плотности морской воды по глубине: а – Чукотское море; б – Баренцево море; в – море Лаптевых; г – Карское море; д – Восточно-Сибирское море; е – все рассматриваемые акватории / Fig. 4. Distribution of seawater density by depth: а – Chukchi Sea; б – Barents Sea; в – Laptev Sea; г – Kara Sea; д – East Siberian Sea; е – all studied water areas

Таблица 1 / Table 1

**Эмпирические коэффициенты полученного уравнения /
Empirical coefficients of the obtained equation**

Акватория / Aquatorium	Коэффициент / Coefficient (a)	Коэффициент / Coefficient (b)
Баренцево море / Barents Sea	1027,4	0,0001
Карское море / Kara Sea	1016,2	0,0021
Море Лаптевых / Laptev Sea	1016,0	0,0019
Восточно-Сибирское море / East Siberian Sea	1019,5	0,0014
Чукотское море / Chukchi Sea	1025,4	0,0002

Исходя из результатов, более 73 % вариаций значения плотности зависят от глубины, то есть модель хорошо описывает данные и ее допустимо использовать для практических расчетов. Для оценки точности модели был проведен расчет стандартного отклонения, который показал разброс значений плотности. Расчет стандартного отклонения выявил высокую степень достоверности в силу небольшого разброса плотности относительно аппроксимирующей кривой. Разброс составил: 0,15, 2,53, 2,03, 1,09, 0,51 кг/м³.

Таблица 2 / Table 2

**Коэффициент детерминации /
Coefficient of determination**

Акватория / Aquatorium	Коэффициент / Coefficient
Баренцево море / Barents Sea	0,73
Карское море / Kara Sea	0,76
Море Лаптевых / Laptev Sea	0,82
Восточно-Сибирское море / East Siberian Sea	0,89
Чукотское море / Chukchi Sea	0,76

Второй этап анализа заключался в усреднении плотности на одноименных горизонтах среднемесячных значений в году при рассмотрении акватории вместе, а не по отдельности. Это необходимо для того, чтобы заполнить отсутствующие данные на некоторых уровнях исследования и создать корректную модель для определения плотности воды в зависимости от глубины. Усредненные данные использовались при построении графика обобщенной зависимости плотности морской воды от глубины (рис. 3е). Эти данные также аппроксимированы методом степенной регрессии, уравнение (2).

В ходе регрессионного анализа получены следующие эмпирические коэффициенты: $a = 1021,2$; $b = 0,0011$.

Как и для первого этапа анализа, произведен расчет коэффициента детерминации для оценки качества регрессионной модели, который составил 0,86. То есть более 86 % вариаций значения плотности зависят от глубины. Расчет стандартного отклонения показал небольшое отклонение 0,97 кг/м³.

Используя уравнение (1) и математическую модель, полученную ранее, был произведен расчет подъемной силы для 1 м³ некоторых распространенных промышленных и природных газов с глубиной. В качестве газов были использованы: водород, метан, углекислый газ, воздух. (рис. 5).

Из рисунка 5 видно, что величина подъемной силы до глубины разработки 200 м практически не зависит от типа применяемого рабочего газа. А на глубине разработки 500 м величина подъемной силы в зависимости от применяемых

газов (от водорода до углекислого газа) уже составляет порядка 10 %.

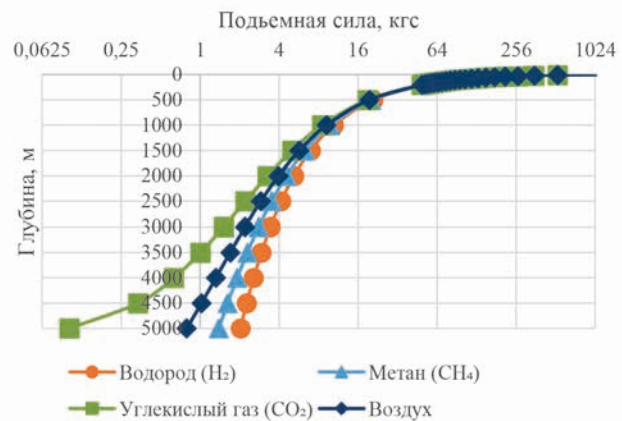


Рис. 5. Изменение подъемной силы газов на различных горизонтах разработки /
Fig. 5. Change of gas lifting force at different horizons of development

Заключение

1. Фактор расслоения плотности вод арктических морей особенно важен при моделировании процесса эксплуатации автономных добычных комплексов, что подтверждается результатами исследования.

2. Разработанные математические модели могут учитывать акватории как по отдельности, так и в совокупности, что позволит увеличить гибкость и адаптивность при проектировании автономного добычного комплекса и расчета его подъемной силы.

3. В условиях арктического шельфа основным критерием по выбору рабочего газа для создания подъемной силы АДК является минимизация себестоимости получения и сжатия до необходимых значений рабочего газа.

4. Определено, что на горизонтах ниже 150 м колебания плотности становятся малозначительными, позволяя рассматривать плотность как постоянную величину в течение года на соответствующих глубинах разработки полезных ископаемых.

5. Установлено, что для максимизации подъемной силы рассматриваемого АДК целесообразнее использовать водород согласно уравнению состояния идеального газа и закона Бойля – Мариотта.

5. Выявлено, что благодаря обобщенному уравнению и уравнениям для каждой акватории в отдельности возможно рассчитать плотность на любой глубине в рамках рассматриваемого в исследовании диапазона. Уравнения возможно использовать в технических расчетах и моделировании освоения ресурсов арктических морей, подъемной силы АДК.

Выводы

1. Использование автономных добычных комплексов представляет собой перспективное технологическое решение для ведения добычных работ на морских месторождениях твердых полезных ископаемых арктического шельфа.

2. Результаты исследований могут быть полезными при выполнении технических расчетов автономных добычных комплексов, принимая во внимание природно-климатические условия конкретной акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Petersen S, Krätschell A, Augustin N, et al. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy*. 2016; 70: 175-187. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.03.012.
2. Кисляков ВЕ, Катышев ПВ, Анушенков АН и др. Изучение влияния низких температур окружающего воздуха и морской воды на возможность добычи твердых полезных ископаемых в арктических водах. *Горная промышленность*. 2024; 4: 81-88. [Kisliakov VE, Katyshev PV, Anushenkov AN, et al. Study of the impact of low ambient air and seawater temperatures on the possibility of mining solid minerals in arctic waters. *Mining Industry Journal*. 2024; 4: 81-88 (In Russ.)]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-81-88.
3. Каминский ВД, Супруненко ОИ, Смирнов АН и др. Современное ресурсное состояние и перспективы освоения МСБ шельфовой области Российской Арктики. *Разведка и охрана недр*. 2016; 9: 136-142. [Kaminsky VD, Suprunenko OI, Smirnov AN, et al. Current resource conditions and prospects for development of the mineral resource base in the shelf zone of the Russian Arctic. *Prospect & protection of mineral resources*. 2016;9: 136-142. (In Russ.)].
4. Kisliakov VE, Linkov IaE, Katyshev PV, et al. Studying possible ways of adapting subsea mining to extreme natural conditions of the Far North. *Minerals and mining engineering*. 2024; 6: 22-28. DOI: 10.21441/1536-1128-2124-6-22-28.
5. Kirsanov AK. Obstacles and prospects of subsea mining of solid minerals in the conditions of the Far North. *Minerals and mining engineering*. 2025; 2: 8-16. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-8-16.
6. Кириченко ЮВ, Каширский АС. Кассетный трал для промышленной добычи железомарганцевых конкреций океанического дна. *Горный журнал*. 2015; 12: 56-61. [Kirichenko YuV, Kashirsky AS. Cassette-type minesweeper for industrial extraction of ferromanganese nodules from the ocean floor. *Mining Journal*. 2015; 12: 56-61. (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2015.12.13.
7. Дробаденко ВП, Вильмис АН, Луконина ОА и др. Анализ способов породозабора путем всасывания при горноразведочных работах на россыпях шельфа. *Разведка и охрана недр*. 2024; 5: 103-108. [Drobadenko VP, Vilms AL, Lukonina OA, et al. Analysis of methods of rock suction exploration in offshore placer operations. *Prospect & protection of mineral resources*. 2024; 5: 103-108. (In Russ.)]. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_5_103.
8. Panda JP, Mitra A, Warrior HV. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2021; 235 (1): 15-29. DOI: 10.1177/1475090220936896.
9. Milosevic Z, Fernandez RAS, Dominguez S, Rossi C. Guidance for Autonomous Underwater Vehicles in Confined Semistructured Environments. *Sensors*. 2020; 20 (24): 7237. DOI: 10.3390/s20247237.
10. Zhang, Xuguang Chen, Lubao Luan, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives. *Earth Energy Science*. 2025; 1 (1): 65-84. DOI: 10.1016/J.EES.2024.08.002.
11. Патент № 2837947 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00, E21C 45/06. Способ добычи полезных ископаемых со дна континентального шельфа и устройство для его осуществления: заявл. 03.07.2025; опубл. 07.04.2025 / Кисляков В.Е., Катышев П.В., Линьков Я.Е.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Сибирский федеральный университет». [Kislyakov VE, Katyshev PV, Linkov IaE. Method for Extraction of Mineral Resources from the Continental Shelf Bottom and Device for Its Implementation. 2025. (Patent RU 2837947 C1). IPC E21C 50/00, E21C 45/06. Applicant: Siberian Federal University ("Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University"). (In Russ.)]
12. Баренцево море – общие сведения. *Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане*. [Barents Sea – General Information. *Unified State Ocean Information System*. (In Russ.)]. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Bar/index.html>.
13. Карское море – общие сведения. *Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане*. [Kara Sea – General information. *Unified State Ocean Information System*. (In Russ.)]. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/index.html>.
14. Море Лаптевых – общие сведения. *Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане*. [Laptev Sea – General information. *Unified State Ocean Information System*. (In Russ.)]. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Laptevix/index.html>.
15. Восточно-Сибирское море – общие сведения. *Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане*. [East Siberian Sea – General information. *Unified State Ocean Information System*. (In Russ.)]. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Vostsib/index.html>.
16. Чукотское море – общие сведения. *Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане*. [Chukchi Sea – General information. *Unified State Ocean Information System*. (In Russ.)]. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Chyk/index.html>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Виктор Евгеньевич Кисляков –
д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: VKislyakov@sfu-kras.ru



Павел Викторович Катышев –
канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: PKatyshev@sfu-kras.ru

ABOUT THE AUTHORS

Victor E. Kislyakov –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, 660041, Krasnoyarsk,
Siberian Federal University, Russian Federation,
e-mail: VKislyakov@sfu-kras.ru

Pavel V. Katyshev –
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian
Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian
Federation, e-mail: PKatyshev@sfu-kras.ru



Ярослав Евгеньевич Линьков –
аспирант, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», 660041, г. Красноярск,
Российская Федерация,
e-mail: Flash198@mail.ru

Yaroslav E. Linkov –
Post-graduate student, Siberian Federal University,
660041, Krasnoyarsk, Russian Federation,
e-mail: Flash198@mail.ru



Никита Андреевич Кайдаш –
младший инженер, ООО «НТЦ
«Геотехнология», 660037, г. Красноярск,
Российская Федерация,
e-mail: info@ntc-geotech.ru

Nikita A. Kaidash –
junior engineer, LLC «NTC «Geotechnologiya»,
Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,
e-mail: info@ntc-geotech.ru



Даниил Александрович Покацкий –
студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», 660041, г. Красноярск,
Российская Федерация,
e-mail: danpok2002@gmail.com

Daniil A. Pokatsky –
student of the Siberian Federal University, 660041,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
e-mail: danpok2002@gmail.com

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.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.05.2025.

Поступила после рецензирования: 02.07.2025.

Принята к публикации: 10.07.2025.

Article info

Received: 24.05.2025.

Revised: 02.07.2025.

Accepted: 10.07.2025.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ УГЛЯ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОДОБЫЧЕ

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, Российская Федерация

✉ havok.08@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены современные технологии, применяемые для сушки угля, такие как барабанные сушилки, пневмосопловые аппараты, устройства псевдоожиженного слоя и устройства контактной сушки. Проведен анализ параметров их работы и конструктивных особенностей с целью оценки применимости этих технологий в условиях подземной гидродобычи угля. Авторы отмечают, что, несмотря на несколько худшие показатели по удельным энергозатратам на 1 т осушенного угля, для подземных условий предпочтительными являются пневмосопловые аппараты и контактной сушки ввиду их меньших габаритов, а также делают вывод о перспективности развития устройств контактной сушки для осушения мелких фракций угля.

Ключевые слова: сушка угля, подземная гидродобыча, контактная сушка

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела моделирования и управления горнотехническими системами Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук за консультации и помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Кравцов АА, Атрушкевич ВА. Анализ технологий сушки угля для их применения в подземной гидродобыче. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):16-22. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-16-22>.

ANALYSIS OF COAL DEWATERING TECHNOLOGIES FOR UNDERGROUND MINING APPLICATIONS

A. A. Kravtsov[✉], V. A. Atrushkevich

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

✉ havok.08@mail.ru

Abstract: Article provides review of modern research of coal dewatering technologies, such as drum drying, tube drying, boiling layer and convection drying. Presented working parameters and constructive characteristics analysis of mentioned technologies to assess their applicability in underground hydraulic coal mines. Authors conclude that despite worse energy efficiency per ton dried, tube and convection dryers are better applicable for underground conditions due to smaller size. Also authors note perspectives of further contact dryers development for dewatering of coal fines.

Keywords: coal dewatering, underground hydraulic mining, conduction drying

Acknowledgments, Funding, Financial Support: 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 AA, Atrushkevich VA. Analysis of coal dewatering technologies for underground mining applications. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):16-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-16-22>.

Введение

Развитие рыночных отношений между предприятия-ми ставит на повестку дня вопрос о повышении качества выпускаемой продукции, что оказывает влияние на формирование договорных и оптовых цен, а следовательно, на эффективность работы предприятия в целом. Одной из характеристик качества продукции угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий является влажность. Вопрос снижения влажности добываемого угля приобретает особую актуальность в связи с увеличением масштабов применения гидродобычи и гидротранспорта, обусловленным переходом «сухих» шахт к локальной и полной отработке запасов гидромеханизированным способом на основе использования технологии с замкнутым циклом подземного обезвоживания и осветления технологической воды.

В настоящее время разработан и используется широкий спектр способов и технических средств, обеспечивающих снижение влажности добываемого угля [1–4]. Важное место среди них занимают технологии и аппараты сушки угля, получившие широкое распространение на перерабатывающих предприятиях. Однако, как показывает анализ, не все существующие сушильные аппараты ввиду специфики и ряда свойственных им недостатков, таких как сложность организации технологического процесса, ограниченная производительность, конструктивная сложность, металлоемкость и высокая стоимость оборудования могут быть использованы в составе комплексов угольных шахт [5–11]. В данной работе проведен анализ различных технологий сушки угля для их применения в современных автоматизированных комплексах подземной гидродобычи.

Цель исследований: анализ применимости различных технологий сушки угля для автоматизированной подземной гидродобычи.

Объект исследования: технологии сушки угля, такие как барабанные сушилки, пневмосопловые аппараты устройства псевдооживленного слоя и устройства контактной сушки.

Метод исследования

Методами исследований выступают поиск и синтез данных из научных статей, отчетов и литературы, отражающих современное применение технологий сушки угля, сравнительный анализ технологий для условий подземной гидродобычи.

Результаты исследования и их обсуждение

Устройства и аппараты для сушки угля нашли широкое применение в добывающей и перерабатывающих отраслях промышленности. При этом технология и техника сушки зачастую тесно увязываются с основными технологическими процессами конкретного производства, что вместе с сохраняющейся тенденцией повышения интенсивности сушки приводит к постоянному совершенствованию конструкций сушильных аппаратов и устройств. Значительное распространение в технологии углеобогащения получила сушка угля в барабанных сушилках [12, 13].

Осушение происходит за счет обдувания породы горячим газом. Для повышения эффективности процесса уголь перемешивается в барабане. Существующие сушилки с барабанами диаметром 2,8 м, длиной 14 м и диаметром 3,5 м, длиной 18, 22 и 27 м используются в промышленности.

Устройство барабанной сушилки приведено на рисунке 1.

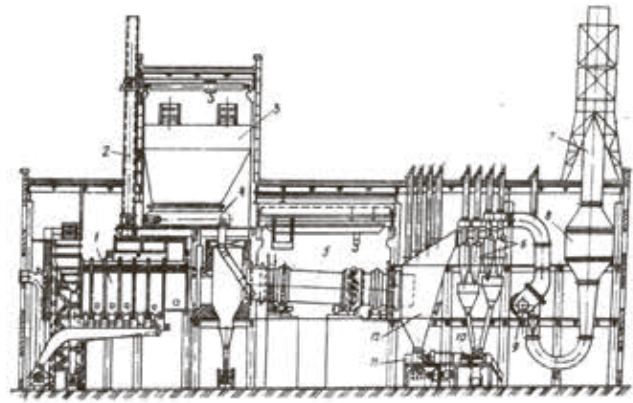


Рис. 1. Устройство барабанной сушилки: 1 – печь; 2 – воздухопровод; 3 – накопитель породы; 4, 11 – питатели; 5 – барабан; 6, 8 – пылеуловители; 7, 9 – отводы продуктов сгорания; 10 – запирающий шлюз; 12 – выход готового продукта /
Fig. 1. Coal drum dryer scheme: 1 – furnace; 2 – air intake; 3 – coal storage; 4, 11 – feeders; 5 – drum; 6, 8 – dust collectors; 7, 9 – combustion gas exhaust; 10 – separator gate; 12 – output

Технология сушки угля в барабанных сушилках состоит в следующем. Сырой уголь попадает в бункер 3, из которого посредством скребкового питателя 4 поступает в сушильный барабан. Ввиду перепада давления, создаваемого дымососом 9, атмосферный воздух через растопочную трубу попадает в топку 1, оттуда уже в нагретом состоянии поступает в барабан. После сушки угля в барабане отработанный воздух пропускается через систему пылеуловителей 6, 8 и через дымовую трубу 7 выбрасывается в атмосферу. Высушенный уголь из барабана попадает в разгрузочную камеру 12.

Для удаления 1 кг влаги из породы барабанные сушилки используют от 4 200 до 6 500 кДж тепловой энергии и 19–76 кВт·ч электроэнергии [14]. Параметры работы сушилок с различными размерами барабанов приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1
Параметры работы барабанных сушилок /
Coal drum dryer working parameters

Параметр / Parameter		Значение для размера барабана, м / Value for different drum size, m			
		2,8 x 14	3,5 x 18	3,5 x 22	3,5 x 27
Производительность, т/ч / Performance, t/h	По исходному углю / by input coal	90	151	170	230
	По испаренной влаге / by evaporated water	9,5	20	26	27
Влажность угля, % / Coal moisture, %	Начальная / initial	18,5	20	17	16,5
	Конечная / final	9	7,8	7	5,7
Температура газов, °C / Gas temperature, °C	Начальная / initial	750	700	750	800
	Конечная / final	80	105	90	80
Состав концентрата, % / Concentrate fraction, %	Мелкий флотационный / fine flotating	55	65	70	81,5
		45	35	30	18,5

Производительность барабанной сушилки заметно возрастает с увеличением частоты вращения барабана и при размещении в нем рациональных внутренних устройств, включая цепные насадки разного типа. Опыты, проведенные на промышленных барабанных сушилках на ЦОФ «Чумаковская», ГОФ «Горняцкая», Череповецком металлургическом заводе и Магнитогорском металлургическом комбинате, подтвердили возможность интенсификации сушки в результате повышения начальной температуры и скорости газов.

С целью повышения интенсивности процесса сушки флотационного концентрата в барабанных сушилках УкрНИИ углеобогащения совместно с работниками обогатительных фабрик и наладочных организаций разработано цепное насадочное устройство, которое обеспечивает в результате повышения взвешенности угля в барабане увеличение производительности на 20–30 % [15].

Основные показатели работы барабанных сушилок с цепными насадками приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры работы барабанных сушилок
с цепными насадками /
Working parameters of coal drum dryer with chain mixer**

Параметр / Parameter	Значение / Value
Производительность, т/ч / Performance, t/h	По исходному углю / by input coal
	377,4
	По испаренной влаге / by evaporated water
	28
Влажность угля, % / Coal moisture, %	Начальная / initial
	Конечная / final
Температура газов, °C / Gas temperature, °C	Начальная / initial
	Конечная / final

Применение цепных насадок значительно интенсифицирует процесс сушки в барабанных сушилках, особенно таких влагоемких продуктов обогащения, как флотационный концентрат и угольный шлам.

В зарубежной практике барабанные сушилки применяют для сушки угольных шламов. Французской фирмой «Вено-Пик» была представлена сушилка Multitube, способная осушать до 400 т угля в час (рис. 2).

Барабан разделен на две секции. В первой размещены винтовая насадка для подъема породы, а также насадки с гребками, навешенными на вал. Вторая секция барабана состоит из шести труб длиной 20 м и диаметром 2,13 м. В трубах размещены периферийные пересыпные лопасти [16].

Несмотря на широкое применение барабанных сушилок в технологии углеобогащения, использование их в составе поверхностных комплексов шахт представляется нерациональным ввиду громоздкости конструкций, значительных капитальных затрат, сложной организации процесса сушки.

Другой распространенной технологией является сушка в трубах-сушилках. Трубы-сушилки относятся к сушильным аппаратам с конвективным теплообменом и прямоточным движением газов и материала. Аппарат состоит из трубы, соединенной с сепаратором или циклоном (рис. 3).

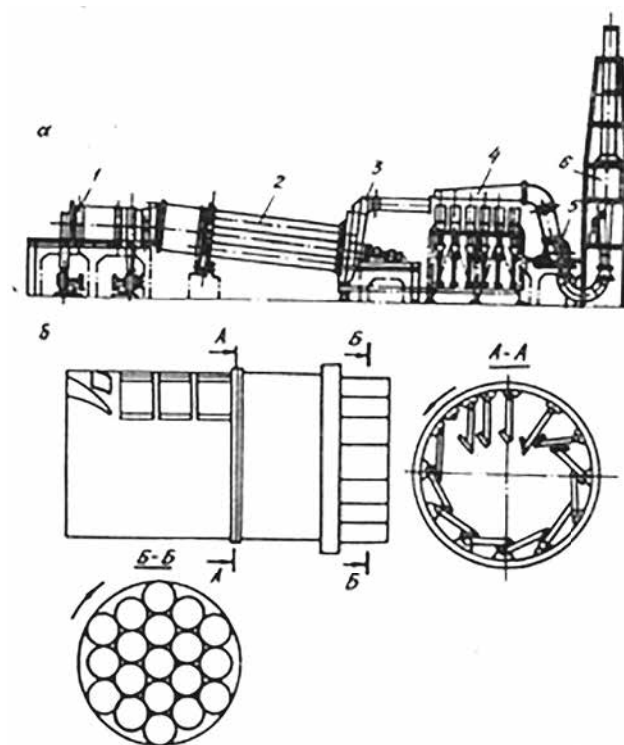


Рис. 2. Барабанная сушилка Multitube: 1 – печь; 2 – барабан; 3 – выход готового продукта; 4 – циклоны; 5 – отвод продуктов сгорания; 6 – пылеуловитель /
Fig. 2. Drum dryer Multitube: 1 – furnace; 2 – drum; 3 – output; 4 – cyclones; 5 – combustion gas exhaust; 6 – dust collector

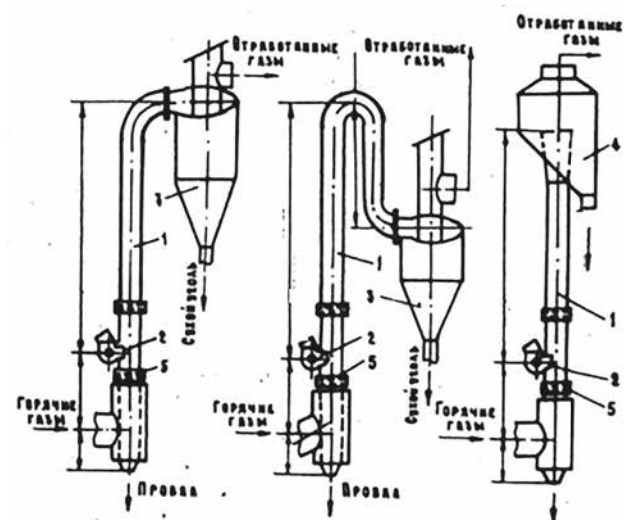


Рис. 3. Различные варианты конструкции труб-сушилок: 1 – труба; 2 – питатель; 3 – циклон; 4 – сепаратор; 5 – компенсатор /
Fig. 3. Different constructions of tube dryer: 1 – tube; 2 – feeder; 3 – cyclone; 4 – separator; 5 – compensator

Движение теплоносителя (газа) идет снизу вверх по трубе, потоком захватывая породу из питателя. В процессе движения породы по трубе происходит осушение. Далее, попадая в циклон, порода отделяется от теплоносителя [17].

Корректная работа такого сушильного аппарата возможна при соблюдении трех условий:

Порода должна быть довольно мелкой, чтобы ее возможно было транспортировать потоком газа.

Объем отводимой влаги должен быть сопоставим с объемом подаваемого газа.

Обводненность породы должна быть такой, чтобы за короткий срок ее пребывания в сушильной камере достигалась требуемая конечная влажность [18, 19].

Существующая тенденция развития сушильной технологии заключается в стремлении к максимальной интенсификации сушки, что при применении труб-сушилок может достигаться в результате таких стандартных приемов, как повышение температурного потенциала, увеличение расхода подаваемого теплоносителя, а также увеличение относительных скоростей между сушильным агентом и частицами сушеного материала.

Преимуществами использования труб-сушилок являются простота конструкции стационарно устанавливаемой сушилки, сравнительно низкие капитальные затраты. К недостаткам данной технологии следует отнести сложность сушки материала во взвешенном состоянии, которая заключается в непрерывном изменении гидродинамических условий двухфазного потока. Эти условия изменяются неодинаково по пути движения потока и по отношению к разным по размеру частицам материала. Характер изменения указанных условий до последнего времени устанавливается на основе эмпирических данных.

Недостатком труб-сушилок является относительно высокая влажность получаемого в результате сушки продукта – 18–20 %. Для каменного угля технология паровой сушки не получила применения.

Возможность интенсификации процесса сушки в трубах-сушилках ограничена необходимостью активизации аэродинамического режима. Однако при увеличении скорости перемещения частиц значительно повышается абразивный износ стенок аппарата, сокращающий срок его службы. Интенсификация процесса тепло- и массопереноса с одновременным уменьшением влияния указанного выше недостатка может осуществляться при использовании эффекта срыва влаги с частиц сушеного материала высокоскоростным газовым потоком, который реализуется при сушке в пневмосопловых аппаратах.

Из пневмосопловых сушилок наибольшее распространение получили аппараты типа трубы Вентури, схемы которых приведены на рисунке 4.

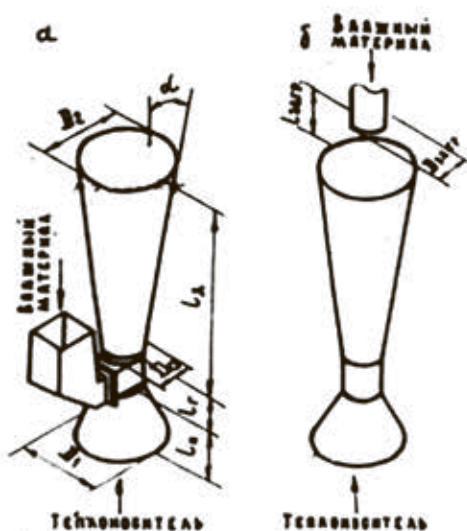


Рис. 4. Схемы прямоточных (а) и противоточных (б) пневмосопловых аппаратов типа трубы Вентури /
Fig. 4. Scheme of direct-flow (a) and counterflow (b) Venturi tube dryers

Преимущество такой конструкции заключается в повышении скорости газа в горловине. При этом создается эффект срыва водяной пленки с поверхности угольных частиц и последующий перевод сорванной влаги в туманообразное состояние. Технология сушки угля в аппаратах типа трубы Вентури позволила в 3–4 раза интенсифицировать процесс конвективной сушки, создать малогабаритные аппараты большой единичной мощности.

Эффективность сушки угля в трубах Вентури можно оценить, проанализировав основные параметры работы прямоточного пневмосоплового аппарата, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Параметры работы прямоточной пневмосопловой сушилки /
Direct-flow Venturi tube dryer working parameters

Параметр / Parameter		Значение / Value				
Производительность по испаренной влаге, кг/ч / Performance by evaporated water, kg/h		417	389	458	473	450
Температура, °C / Temperature, °C	Газа начальная / gas initial	1 190	1 200	1 178	1 184	1 184
	Газа конечная / gas final	109	105	100	85	104
	Материала начальная / material initial	15	15	15	15	15
	Материала конечная / material final	64	64	60	72	62
Влажность материала, % / Material moisture, %	Начальная / initial	11,9	12	12,3	12,6	12,1
	Конечная / final	5,4	5,8	4,7	4,5	5
Влагонапряжение объема, кг/м³·ч / Volume moisture stress, kg/m³·h		3 475	3 241	3 816	3 941	3 450

В аппаратах Вентури влагонапряжение объема достигает 3 250–3 900 кг/м³·ч в отличие от труб-сушилок, влагонапряжение которых не превышает 1 300 кг/м³·ч. Результаты работы пневмосопловой сушилки, приведенные в таблице 4, показывают, что интенсификация процесса в значительной мере определяется температурой вводимых в аппарат газов.

Таблица 4 / Table 4

Производительность прямоточной пневмосопловой сушилки при различных начальных температурах /
Direct-flow Venturi tube dryer performance for different initial temperatures

Параметр / Parameter		Значение / Value			
Начальная температура, °C / Initial temperature, °C		400	600	1 200	1 300
Производительность по влажному материалу, кг/ч / Performance by wet material, kg/h		1 700	3 000	6 000	6 550
Влажность антрацита, % / Anthracite moisture, %	Начальная / initial	12,1	11,9	12,2	13,4
	Конечная / final	3	4,8	4,2	4,7

Применение пневмосопловых сушильных аппаратов позволяет сократить затраты на строительство и эксплуатацию сушильных установок в сравнении с ранее рассмотренными способами сушки. К недостаткам сушилок типа трубы Вен-

тури следует отнести ограниченную продолжительность сушки, ввиду чего необходимо разогревать газ до высоких температур, что может повлечь возгорание угля в случае некорректной остановки сушилки. Также к недостаткам можно отнести большой расход газа, который загрязняет окружающую воздушную среду, если не предусмотрена его очистка.

Устранить такие недостатки пневмосопловых аппаратов, как малая продолжительность сушки и малый диапазон ее регулирования, позволяет использование сушилок псевдооживленного слоя. Сушке в аппаратах этого типа подвергаются материалы, время сушки которых составляет десятки секунд или минут. Сушка в этих аппаратах происходит за счет прохождения горячих газов через тонкий слой материала, равномерно распределенный на решетке. При этом материал постоянно перемешивается потоком газа, что приводит его в состояние, близкое к жидкому – псевдооживленное состояние [20]. Определенным диапазонам значений скорости протекания или удельного расхода газов соответствуют основные режимы псевдооживления и состояния слоя материала (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Параметры различных режимов псевдооживления /
Parameters of different regimes of pseudo-liquefaction

Удельный расход отработанных газов, тыс. м³/т·ч / Specific exhaust of gas, thousands of m³/t·h	Режим псевдооживления / Mode of pseudo-liquefaction	Состояние псевдооживленного слоя / State of pseudo-liquefied layer
10–15	Пузырьковый, струйный / Bubbling, jet	Кипящий / Boiling
15–20	Развитый струйный / Developed jet	Взвешенный / Suspended
20–30	Форсированный струйный / Forced jet	Аэрофонтанирующий / Airgushing

В соответствии с указанными режимами разработаны и используются сушильные устройства, в которых реализуются различные состояния псевдооживленного слоя. Камера сушилок, работающих в режиме «кипящего» слоя, разделена на две части. В нижнюю часть, облицованную огнеупорным материалом, подается горячий газ, а решетка со слоем породы находится в верхней части [21, 22]. Примером такого агрегата является сушильная установка ЦОФ «Свердловская» (рис. 5). Она состоит из двух параллельных линий пылеулавливания, каждая из которых имеет одиночный циклон, батарейный пылеуловитель и мокрый пылеуловитель; тягодутьевых машин, включающих в себя два мельничных вентилятора с электродвигателями мощностью по 500 кВт и два дымососа с электродвигателями мощностью по 300 кВт. Топка и нижняя часть сушильной установки работают под давлением 5–6 кПа, верхняя часть – под разрежением 0,06 кПа.

«Кипящий» и «взвешенный» слои образуются гидродинамическими силами газового потока, продуваемого через слой. Такой способ создания псевдооживленного слоя, хотя и характеризуется относительной простотой и эффективностью, имеет ряд существенных недостатков: жесткую зависимость между тепловым процессом и гидродинамическими параметрами газового потока, неоднородную структуру кипящего слоя, а также значительный вынос мелких частиц из аппарата. Одним из путей устранения указанных недо-

статков или снижения их вредного влияния является применение принципа виброкипания. В устройствах с виброкипящим слоем псевдооживление достигается не только путем пропускания газа через слой материала, но также и в результате механических вибрационных воздействий на слой, при которых представляется возможным осуществлять подачу теплоносителя и снизу, и сверху материала.

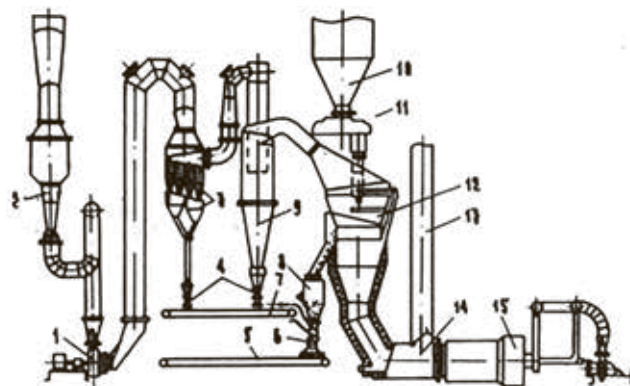


Рис. 5. Сушильная установка кипящего слоя центральной обогатительной фабрики «Свердловская»: 1 – отвод продуктов сгорания; 2, 3 – пылеуловители; 4 – запирающий шлюз; 5, 7 – конвейерные ленты; 6 – питатель; 8 – выход готового продукта; 9 – циклон; 10 – накопитель породы; 11 – питатель; 12 – решетка; 13 – воздухопровод; 14 – соединительные трубы; 15 – печь /

Fig. 5. Boiling layer dryer «Sverdlovskaya»: 1 – combustion gas exhaust; 2, 3 – dust collectors; 4 – separator gate; 5, 7 – conveyor belts; 6 – feeder; 8 – output; 9 – cyclone; 10 – coal storage; 11 – feeder; 12 – grid; 13 – air intake; 14 – uptake; 15 – furnace

По мнению ряда исследователей, использование принципа псевдооживления является наиболее перспективным для создания сушильных устройств большой единичной мощности для сушки продуктов мокрого обогащения угля [23]. Однако увеличение мощности аппаратов этого типа предъявляет повышенные требования к их надежности, так как при неравномерном распределении псевдооживленного слоя по площади газораспределительной решетки образуются застойные и малоподвижные зоны.

Проблемным элементом конструкции таких сушилок выступает решетка, которая находится в постоянном тепловом напряжении. С целью уменьшения износа газораспределительных решеток и снижения опасности возгорания находящегося на них угля обычно устанавливают температуру тазов не более 550–600 °С. Кроме названных недостатков, следует также отметить капиталоемкость, металлоемкость, низкую мобильность, конструктивную сложность и громоздкость установок для сушки угля в псевдооживленном слое.

Все приведенные выше способы сушки и устройства по их реализации можно условно отнести к аппаратам и технологиям с конвективным теплообменом. Теплоносителем, как правило, является нагретая газовоздушная смесь, непосредственно контактирующая с частицами высушиваемого материала. Далее рассмотрены способы и аппараты контактной сушки, в которых тепло материалу передается от нагретой контактирующей с ним поверхности [24, 25].

Разновидностью аппаратов контактной сушки являются шнековые сушилки. В США и Канаде для сушки отходов флотации после их механического обезвоживания широко применяются шнековые сушилки фирмы Holo-Flite (рис. 6).

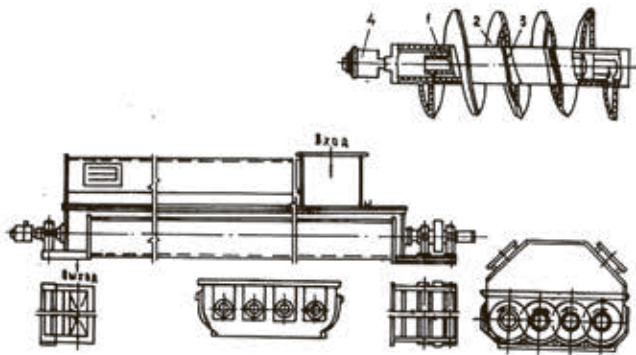


Рис. 6. Контактная сушилка фирмы Holo-Flite: 1 – шнек; 2 – компенсатор; 3 – пустотелый вал; 4 – подшипник /

Fig. 6. Holo-Flite contact dryer: 1 – feed-screw; 2 – compensator; 3 – hollow shaft; 4 – bearing

Сушка происходит за счет кондуктивного теплообмена между шнеком и породой. Подвод тепла осуществляется посредством теплоносителя, протекающего внутри вала шнека. Материалом шнеков и подшипников выступает жаропрочная сталь. Шнеки приводятся в движение гидравлическими приводами индивидуально либо попарно. Теплоносителем обычно выступает синтетическое масло с высокой температурой кипения. Шнеки вращаются со скоростью 4–15 об/мин. Для удаления 1 кг шнековая сушилка использует от 4 500 до 5 500 кДж тепловой энергии до 16 кВт·ч электроэнергии.

В устройствах данного типа достигается равномерная влажность материала и незначительное пылеобразование. Недостатками являются сложность ремонта и эксплуатации установки.

Заключение

1. В статье рассмотрены технологии барабанной сушики, пневмосопловые аппараты, устройства псевдоожиженного слоя и устройства контактной сушики. Не все рассмотренные технологии могут применяться в условиях подземной гидродобычи, некоторые, например устройства барабанной сушики,

обладают значительными габаритами, что осложняет их размещение в подземных выработках. Для этого лучше подходят пневмосопловые и контактные сушилки.

2. Недостатки, присущие применяемым в отрасли технологиям и средствам механизации сушки угля, не обеспечивают возможности их эффективного использования для снижения влажности мелких угольных фракций в поверхностных комплексах гидрошахт и гидроучастков шахт с обычной технологией.

3. Перспективным направлением снижения влажности мелких угольных фракций является использование технологии контактной сушки.

Выводы

Анализ рассмотренных технологий и средств механизации процесса сушки угля, применявшихся на обогащательных фабриках и других промышленных предприятиях в СССР и за рубежом, позволяет сделать следующие выводы:

Установки барабанной сушики и устройства псевдоожиженного слоя нецелесообразно применять в условиях подземной гидродобычи ввиду их крупных габаритов. Пневмосопловые аппараты и устройства контактной сушики лучше подходят для размещения в подземных выработках.

Существующие устройства для сушки угля обладают рядом недостатков, не позволяющих эффективно использовать их для подсушивания мелких фракций угля до кондиционной влажности в поверхностных технологических комплексах гидрошахт и гидроучастков шахт с обычной технологией.

Разработку новых конструкций сушильных аппаратов необходимо вести на основе технологии контактной сушки, обеспечивающей более высокую интенсивность процесса в сравнении с установками конвективного теплообмена.

Разработку сушильных устройств для обозначенных условий необходимо вести в соответствии с требованиями обеспечения контактности, мобильности, простоты конструкции, низких капитальных и эксплуатационных затрат, надежности эксплуатации и экологической чистоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Саломатов ВВ, Карелин ВА. Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024; 335 (5): 182-193. [Salomatov VV, Karelin VA. Review of modern coal dewatering methods with their efficiency assessment. *News of Tomsk polytechnical state university*. 2024; 335 (5): 182-193. (In Russ.).]
2. Karthikeyan M, Zhonghua W, Mujumdar AS. Low-rank coal drying technologies – current status and new developments. *Drying Technology*. 2009; 27 (3): 403-415.
3. Rao Z, Zhao Y, Huang C, et al. Recent developments in drying and dewatering for low rank coals. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015; 46: 1-11.
4. Osman H, Jangam SV, Lease JD, et al. Drying of low-rank coal (LRC) – a review of recent patents and innovations. *Drying Technology*. 2011; 29 (15): 1763-1783.
5. Rahman M, Kurian V, Pudasainee D, et al. Comparative study on lignite coal drying by different methods. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020; 40: 2: 90-106.
6. Кириллов КМ, Пикалов МФ. Термическая сушка угля – ренессанс технологии. *Уголь*. 2012; 12: 86-88. [Kirilov KM, Pikalov MF. Thermal coal drying – renaissance of technology. *Coal*. 2012; 12: 86-88. (In Russ.).]
7. Yang X, Zhao Y, Luo Z, et al. Brown coal drying processes-a review. *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment*. 2011; 1: 377-381.
8. Yan J, Han X. Advances in Coal Drying. *Drying of Biomass, Biosolids, and Coal*. CRC Press, 2019: 135-164.
9. Violidakis I, Drosatos P, Nikolopoulos N. Critical review of current industrial scale lignite drying technologies. *Low-rank coals for power generation, fuel and chemical production*. 2017: 41-71.
10. Noble A, Luttrell GH. A review of state-of-the-art processing operations in coal preparation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015; 25 (4): 511-521.
11. Parekh BK. Dewatering of fine coal and refuse slurries-problems and possibilities. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009; 1 (1): 621-626.
12. Ахунбаев АА, Хусанбоев МАУ. Влияние вращения сушильного барабана на распределение материала. *Universum: технические науки*.

- 2022; 4-2 (97): 16-24. [Akhnubaev AA, Khusanboev MAU. Influence of drying drum rotation on material distribution. *Universum: technical sciences*. 2022; 4-2 (97): 16-24. (In Russ.)].
13. Kang M, Bian J, Li B, et al. Advanced progress of numerical simulation in drum drying process: Gas-solid flow model and simulation of flow characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024; 157: 107758.
14. Marbun AG, Dwiyanoro BA, Tarmizi AM. Study of coal drying characteristics using boiler blowdown in a rotary coal dryer. *JMES The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2022; 6 (1): 37-45.
15. Слесарев ЮИ, Филиппов ВА. Устройство, эксплуатация и ремонт оборудования сушильных установок. Москва, 1990: 191. [Slesarev UI, Filipov VA. Structure, use and repair of drying devices. Moscow, 1990: 191. (In Russ.)].
16. Филиппов ВА. Конструкция, расчет и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. Москва, 1979: 313. [Filipov VA. Construction, design and use of devices for minerals drying. Moscow, 1979: 313. (In Russ.)].
17. Хашина НВ. Теплообменные процессы при сушке угля горячим газом. *Химия твердого топлива*. 2005; 6: 45-53. [Hashina NV. Heat exchange processes in hot gas coal drying. *Chemistry of solid fuel*. 2005; 6: 45-53. (In Russ.)].
18. Chen Z, Wu W, Agarwal PK. Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle. *Fuel*. 2000; 79(8): 961-974.
19. Синицын НН, Запатрина НВ, Грибкова ЮВ и др. Математическое моделирование сушки плотного слоя кусков угля, продуваемого отходящими газами котлоагрегатов. *Вестник кибернетики*. 2023; 22 (2): 92-99. [Sinitin NN, Zapatrina NV, Gribkova UV, et al. Mathematical modeling of drying of thick coal layer blown through with boiler exhausted gases. *News of cybernetics*. 2023; 22 (2): 92-99. (In Russ.)].
20. Ван Ч, Ван Д, Чхэнь Ц и др. Изучение механизма тонкослойной сушки и диффузии низкосортного угля Внутренней Монголии и провинции Юньнань. *Записки Горного института*. 2024; 266: 326-338. [Van C, Van D, Chen C, et al. Study of thin-layer drying mechanics and diffusion of low-grade coal in Inner Mongolia and Junjan province. *Notes of Mining institute*. 2024; 266: 326-338. (In Russ.)].
21. Halim A, Widyanti AA, Wahyudi CD, et al. A Pilot Plant Study of Coal Dryer: Simulation and Experiment. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. 2022; 22 (1): 124-140.
22. Гарбер В, Козлов В, Кириллов К. Условия безопасной работы аппаратов термической сушки угля. *Уголь*. 2014; 6: 62-65. [Garber V, Kozlov V, Kirillov K. Condition of coal thermal dryers safe operation. *Coal*. 2014; 6: 62-65. (In Russ.)].
23. Somov AA, Tugova AN, Makarushin MN, et al. Coal slurry drying process research. *Thermal Engineering*. 2018; 65: 555-561.
24. Катянин МС, Бочкарев ВА. Анализ способов сушки угля при подготовке его к сжиганию. *Повышение эффективности производства и использования энергии*. 2022: 147. [Katyatin MS, Bochkarev VA. Analysis of coal drying method for its burning preparation. *Increase of energy use and production efficiency*. 2022: 147 (In Russ.)].
25. Zheng C, Yao Q, Li X, et al. Experimental investigation of mechanical characteristics of coal samples at different drying temperatures. *Drying Technology*. 2022; 40 (16): 3483-3495.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Алексей Александрович Кравцов – аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: havok.08@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Kravtsov – Postgraduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: havok.08@mail.ru



Виктор Аркадьевич Атрушкевич – 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, 111020, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: iugi@mail.ru

Victor A. Atrushkevich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, 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.

Информация о статье: Поступила в редакцию: 20.05.2025. Поступила после рецензирования: 01.08.2025. Принята к публикации: 03.08.2025.

Article info: Received: 20.05.2025. Revised: 01.08.2025. Accepted: 03.08.2025.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ КАРЬЕРОВ ДЛЯ ИЗЫСКАНИЯ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ

В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов✉

ФГБУН «Институт горного дела» УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ ukr07@mail.ru

Аннотация: Приведены основы разработанной методики, позволяющей в автоматическом режиме оценить соотношение фронтов горных работ и качественные показатели запасов полезного ископаемого (ПИ) на рабочих горизонтах карьера. Предложенная методика предназначена для автоматизированного планирования горных работ в режиме управления качеством сырья и позволяет определить резервы горного производства, установить преобладающий технологический сорт рудного сырья в анализируемых участках месторождения, выбрать рациональный способ добычи сырья с учетом его качества. Использование методики способствует повышению эффективности планирования горных работ с учетом качества сырья, что в свою очередь позволяет увеличить степень извлечения ценных компонентов и обеспечить комплексное использование минеральных ресурсов.

Ключевые слова: интенсификация горных работ, фронт горных работ, парк экскаваторов, горно-геологическая информационная система, горно-геометрический анализ, геометризация

Благодарности, признательность, финансирование: 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 «Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России» (FUWE-2025-0001), гос. задание № 075-00410-25-00. г. р. № 1022040200004-9-1.5.1

Для цитирования: Кантемиров ВД, Яковлев АМ, Титов РС. Методика оценки горнотехнических условий отработки карьеров для изыскания резервов повышения интенсивности горных работ. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):23-30. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-23-30>.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE MINING CONDITIONS OF QUARRYING TO FIND RESERVES TO INCREASE THE INTENSITY OF MINING OPERATIONS

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

Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

✉ ukr07@mail.ru

Abstract: The article presents the basics of the developed methodology, which makes it possible to automatically assess the ratio of mining fronts and qualitative indicators of mineral reserves (PI) on the working horizons of the quarry. The proposed methodology is designed for automated planning of mining operations in the raw material quality management mode and allows you to determine the reserves of mining production; to establish the predominant technological grade of ore raw materials in the analyzed areas of the deposit; choose a rational way to extract raw materials, taking into account their quality. The use of the methodology helps to increase the efficiency of mining planning, taking into account the quality of raw materials, which in turn makes it possible to increase the degree of extraction of valuable components and ensure the integrated use of mineral resources.

Acknowledgments, financial support: 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. Methodology

for substantiating the prospects of technological development of the integrated development of mineral resources of solid minerals in Russia (FUWE-2025-0001), state assignment №.075-00410-25-00. born №. 1022040200004-9-1.5.1.

Keywords: mining intensification, mining front, excavator fleet, mining and geological information system, mining and geometric analysis, geometrization

For citation: Kantemirov VD, Yakovlev AM, Titov RS. Methodology for assessing the mining conditions of quarrying to find reserves to increase the intensity of mining operations. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):23-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-23-30>.

Введение

Ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий добычи полезных ископаемых по мере понижения горных работ при отработке сложноструктурных месторождений способствует снижению интенсивности их отработки на глубоких горизонтах карьеров. В связи с этим возникает необходимость в создании инновационных методик, позволяющих на основе аудита состояния горных работ в карьере выявить резервы повышения интенсивности добычи и обеспечить планирование горных работ наиболее экономически эффективным способом [1–4].

Цель работы: снижение трудоемкости и повышение качества процессов планирования горных работ.

Материал и методы исследований

Блок-схема методики по оценке состояния открытых горных работ приведена на рисунке 1. Исходными данными для анализа являются блочные и каркасные модели, построен-

ные на основе погоризонтных планов с контурами рудных тел и с интервальными данными о качестве руды на основании обработки информации от скважин детальной разведки месторождения, планы и схемы развития открытых горных работ по этапам освоения месторождения ПИ.

Методика поиска резервов интенсификации горных работ основана на трех направлениях анализа [1–9]:

- оценке структуры фронтов горных работ в карьере;
- аудите запасов полезного ископаемого и объемов вскрышных пород с их распределением по горизонтам карьера;
- учете данных о фактической производительности выемочного оборудования в карьерах.

Методика апробирована на примере Центрального карьера АО «Карельский окатыш». Центральный карьер разрабатывает Костомукшское месторождение железистых кварцитов и является основным по объемам запасов на ГОКе. На период оценки горные работы в карьере велись на 17 горизон-

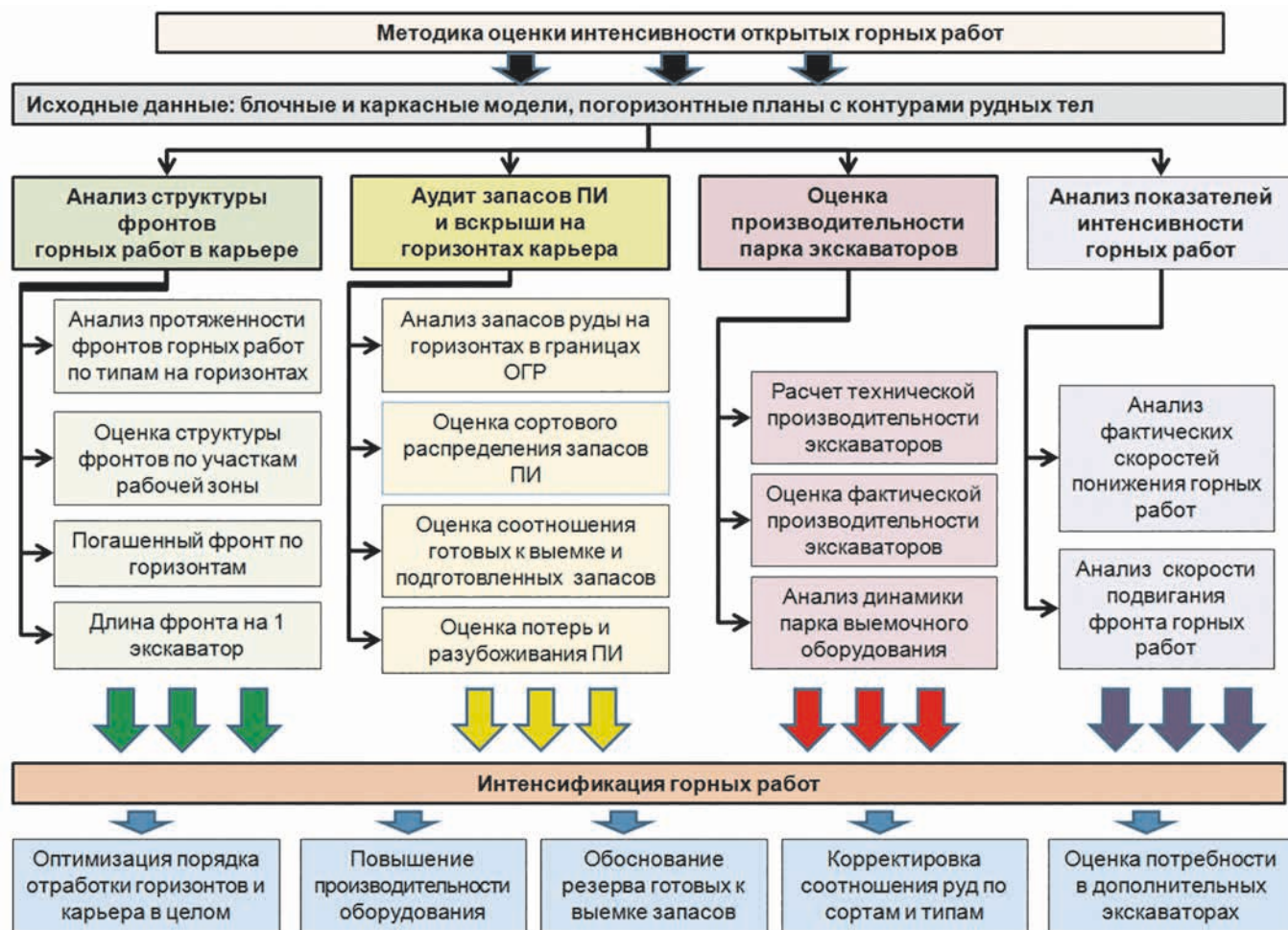


Рис. 1. Блок-схема методики оценки интенсивности открытых горных работ /
Fig. 1. Block diagram of the methodology for assessing the intensity of open-pit mining

тах (гор. +235 м ÷ -140 м). При разработке карьера используется комплекс сухой магнитной сепарации, расположенный на поверхности в районе Восточного борта. Балансовые запасы карьера превышают 500 млн т железной руды.

Анализ структуры фронтов горных работ в карьере

Фактор интенсивности развития горных работ при разработке наклонных и крутопадающих залежей, характерных для глубоких карьеров, оценивается через скорость понижения (углубки) горных работ и подвигания горных работ в горизонтальном направлении. Оценка протяженности и структуры фронта горных работ производится на основе данных горно-геометрического анализа и с использованием разработанного в лаборатории управления качеством минерального сырья (УКР) ИГД УрО РАН программного обеспечения.

Скорость подвигания фронта работ в единицу времени характеризует интенсивность отработки месторождения и зависит от мощности пласта полезного ископаемого, вида погрузочного и транспортного оборудования, а также производительной мощности карьера. При разработке наклонных и крутопадающих месторождений фронт работ карьера непрерывно перемещается к его предельному положению как в плане, так и по глубине.

С использованием разработанной на языке Python программы производилась обработка данных, систематизация по структурным типам фронтов горных работ, а также определялась длина различных типов выделенных участков фронта [10, 11]. Автоматизированный анализ структуры фронтов горных работ позволяет в блочной модели карьера выделить участки активного фронта, на котором ведутся горные работы. Оценка производилась на основе анализа ширины рабочих площадок на горизонтах карьера. Если ширина рабочих площадок на горизонте превышает 45 м (для условий Центрального карьера АО «Карельский окатыш»), то фронт считался активным, а если меньше 45 м, то фронт относился к пассивному. При этом в соответствии с проектом отработки карьера минимальная ширина рабочей площадки была принята 35 м, нормальная ширина рабочей площадки при ведении БВР – 72 м.

Последующий анализ фронта производился оператором. При этом выделялись участки фронта, которые погашены на предельном контуре карьера, и участки консервации по руде и вскрыше, которые впоследствии с помощью компьютерной программы систематизировались с выделением активного и пассивного фронтов.

Компьютерной программой определялась длина участков фронтов по следующим типам и видам горной массы (добыча руды или вскрыша):

- *активный фронт* – это участок фронта горных работ на горизонте карьера, где имеются готовые и подготовленные к выемке запасы и существует возможность размещения на вышележащем уступе (горизонте) минимальной рабочей площадки;
- *законсервированный фронт* – это участок фронта горных работ на горизонте карьера, для отработки которого необходимо обеспечить подвигание вышележащих уступов для размещения минимальной рабочей площадки;
- *погашенный фронт* – это участок фронта горных работ по достижению уступов предельного проектного положения на горизонте.

Данные о структуре фронтов горных работ с помощью разработанного программного обеспечения заносились в та-

блицу, производился статистический анализ и визуализация состояния горнотехнических условий разработки. Графической основой для анализа являлась блочная модель месторождения с выделенными рудными телами и границами карьера по этапам его разработки.

Таким образом, для каждого горизонта карьера выделялись участки вскрышного и добычного фронта по длине, в том числе:

- *активного*, где возможно подвигание горных работ, при этом параметры участка фронта позволяют организовать рабочую площадку нужной ширины на вышележащем уступе;
- *участки консервации*, где для размещения рабочей площадки необходимо подвигание вышележащего уступа.

Аудит запасов полезного ископаемого и горнотехнических условий разработки карьера

Следующим этапом анализа горнотехнических условий является аудит запасов месторождения в пределах карьерного поля. Для этого уточняются объемы между цифровыми топографическими моделями предельного проектного и текущего положений горных работ. С их помощью обосновывается остаток запасов различных типов и сортов руд и вскрышных пород. Производится оценка доли горизонта в запасах и объемах вскрыши по горизонтам карьера. Для каждого горизонта учитывается взаимосвязь с верхним и нижним горизонтом.

Анализ производился на основе общих положений горно-геометрическим методом с установлением пространственных ограничений в составе двух цифровых топографических моделей:

- предельного контура карьера на конец отработки;
- текущего положения горных работ, реализованного в блочной модели для планирования горных работ.

Результаты анализа горнотехнических условий разработки Центрального карьера АО «Карельский окатыш», выполненного в соответствии с методикой, отражены на рисунке 2.

Оценка парка забойных экскаваторов

Следующим этапом анализа интенсивности горных работ является оценка распределения экскаваторов в карьерном пространстве и их фактической производительности в сравнении с технически возможной эксплуатационной производительностью. Результаты анализа позволяют оценить коэффициент использования оборудования и технические возможности текущего парка горных машин для интенсификации горных работ [12–15].

Выемочно-погрузочные работы в карьерах АО «Карельский окатыш» на добыче и вскрыше производятся экскаваторами типа «мехлопата» ЭКГ-10, ЭКГ-15 и ЭКГ-20. Проектом предусмотрена выемка ПИ при высоте уступа 15 м с предварительным рыхлением горной массы с помощью буровзрывных работ (БВР). Результаты анализа экскаваторных работ показывают снижение фактической производительности от технически возможной в 1,3–1,9 раза (рис. 3), что связано со сложными горнотехническими условиями разработки.

Установлено, что для выполнения годовой программы ГОКа по выемке горной массы в объеме 44–46 млн м³ необходимое количество карьерных экскаваторов типа ЭКГ составит до 28 единиц при фактическом наличии 26 единиц.

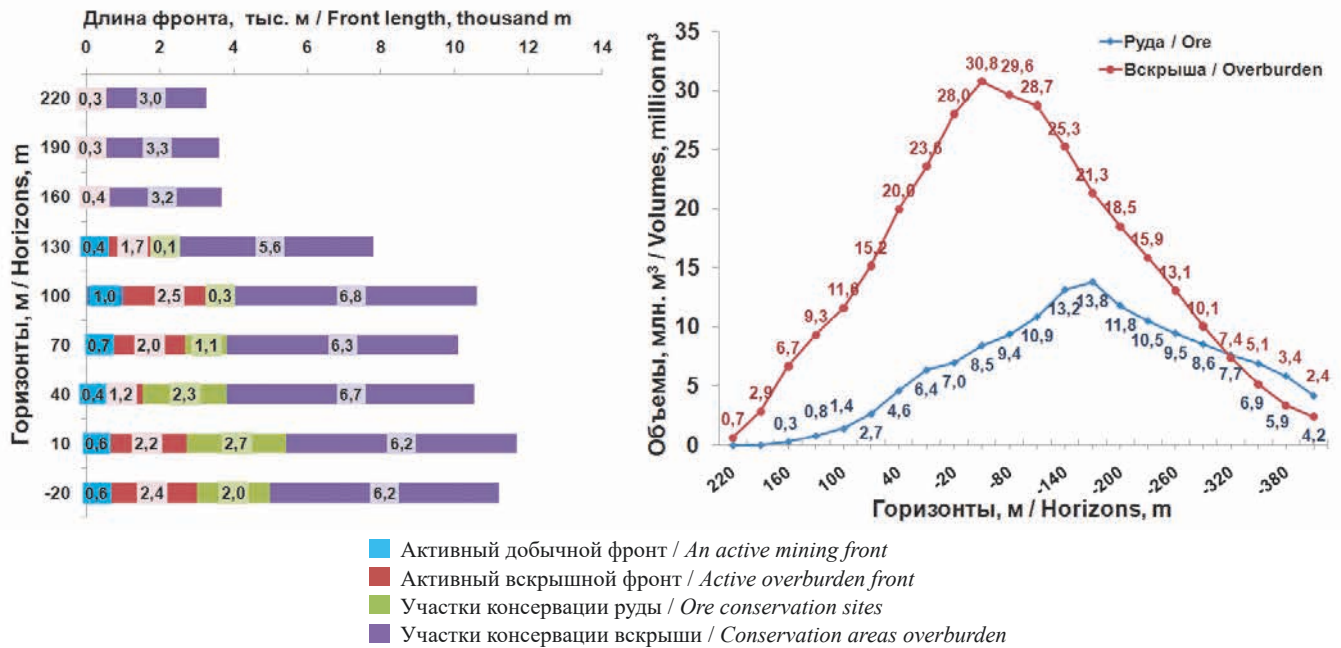


Рис. 2. Распределение фронтов горных работ и объемов руды и вскрыши по горизонтам Центрального карьера АО «Карельский окатыш» /
Fig. 2. Distribution of mining fronts and volumes of ore and overburden along the horizons of the Central Quarry of Karelsky Okatysh JSC

Протяженность активного фронта горных работ в карьере определяется следующим выражением, м:

$$\Phi_a^k = n_{p.3} \Phi_3 = \frac{Q_{гм}^k}{Q_{г.3}} \Phi_3, \quad (1)$$

где $n_{p.3}$ – количество рабочих забоев в карьере, шт.;

Φ_3 – удельный фронт горных работ, приходящийся на одну выемочную машину (длина экскаваторного блока), м;

$Q_{гм}^k$ – годовая производственная мощность карьера по горной массе, м³/год;

$Q_{г.3}$ – средняя годовая производительность экскаватора, м³/год.

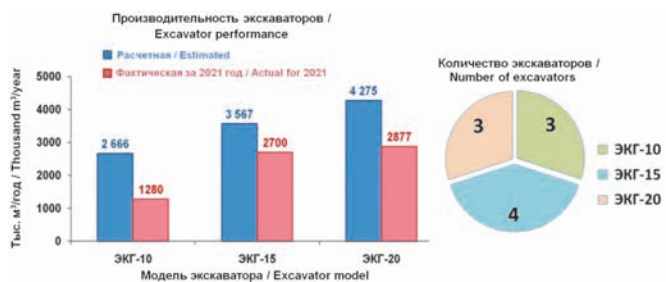


Рис. 3. Производительность экскаваторов на Центральном карьере АО «Карельский окатыш» /
Fig. 3. Productivity of excavators at the Central Quarry of Karelsky Okatysh JSC

Определяется диспропорция (соотношение) общего (суммарного) и активного фронтов горных работ, дол. ед.:

$$\frac{\Phi_a^k}{\Phi_o^k} < 1, \quad (2)$$

где Φ_o^k – длина общего фронта горных работ карьера, м.

С учетом диспропорции фронтов (2) длина общего фронта горных работ карьера, обеспечивающая расстановку расчетного парка экскаваторов, будет определяться следующим выражением, м:

$$\Phi_o^k = \left(\left[\frac{Q_{г.п}^k}{Q_{г.п}^3} + \frac{Q_{г.в}^k}{Q_{г.в}^3} \right] + n_{p.3} \right) \Phi_3 = \left(\frac{Q_{гм}^k}{Q_{г.3}} + n_{p.3} \right) \Phi_3 = (n_{p.3} + n_{p.3.3}) \Phi_3 = N_3 \Phi_3, \quad (3)$$

где Φ_o^k – общий фронт горных работ карьера, м;

$Q_{г.п}^k$ – годовая производительность экскаватора по руде, м³/год;

$Q_{г.в}^k$ – годовая производительность экскаватора по вскрыше, м³/год;

$n_{p.3}$ и $n_{p.3.3}$ – количество рабочих и резервных забоев (с минимальной шириной рабочей площадки) в карьере, шт.;

N_3 – общее число забоев (экскаваторных блоков) в карьере, шт.

Исходя из практики установлено оптимальное условие организации горных работ, когда они производятся в пределах активного фронта при кратном числе забоев.

С учетом обеспечения экскаватора достаточным объемом взорванной горной массы в забое минимальная длина удельного фронта горных работ составит, м:

$$\Phi_3 \geq \frac{k_p Q_{месс}^3}{B_{б.3} h_y} = \frac{k_p Q_{месс}^3}{(W + [n_{p.3} - 1] b) h_y}, \quad (4)$$

где k_p – коэффициент резерва, требуемое количество месяцев или дней работы экскаватора по объему взрываемой массы и переходящим запасом взорванной горной массы (1–3), мес.;

$Q_{месс}^3$ – производительность экскаватора в месяц, м³/мес.;

W – ЛСПП первого ряда взрывных скважин, м;

$n_{p.3}$ – количество взрываемых рядов скважин, шт.;

b – расстояние между рядами скважин, м;

h_y – высота уступа, м.

Для обеспечения максимально возможной производительности экскаватора минимальная длина удельного фронта горных работ составит, м:

$$\Phi_3 \geq 60 \frac{k_p T_c^3}{B_{6.3} h_y} E k_3 n_{\text{ц}} \eta_o, \quad (5)$$

где T_c^3 – число часов работы экскаватора в сутки;
 E – вместимость ковша экскаватора, м³;
 k_3 – коэффициент экскавации, дол. ед.;
 $n_{\text{ц}}$ – число циклов экскавации в минуту, ед.;
 η_o – коэффициент обеспечения забоя порожняком, дол. ед.

Минимальная длина удельного фронта работ по транспортным условиям (табл.) должна удовлетворять следующему условию, м:

$$\Phi_3 \geq \frac{1000 h_y}{i} + 2 R_{\min}, \quad (6)$$

где i – уклон автосъезда, ‰;
 $R_{\min}$ – минимальный радиус поворота автосамосвала, м.

Таблица / Table

Оптимальные размеры удельного фронта горных работ на основе анализа работы действующих рудных карьеров / Optimal size of the specific mining front based on an analysis of the operation of existing ore pits

Объем ковша выемочной машины E, м ³ / Bucket volume of the dredging machine, m ³	Длина фронта на автомобильный транспорт при системе разработки Φ_y , м / The length of the front for road transport in the development system, m	
	продольная / longitudinal	поперечная / transverse
2,5–3	250–300	150–200
4–6	450–500	250–300
8	550–600	350–400
10–12	600–700	400–500
20 и более	750–800	400–500

Количество экскаваторов, необходимое для выполнения годового объема добычных работ с учетом их средней эксплуатационной производительности, будет определяться следующим выражением, шт.:

$$N_3 = \frac{k_n \Phi_o h_y v_{\Phi}}{Q_{\text{см}} n_{\text{г}}^{\text{г}}}, \quad (7)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий резервные забои и неравномерность ведения горных работ ($k_n = 1,1–1,25$), м;
 Φ_o – протяженность общего фронта горных работ, м;
 h_y – высота уступа, м;
 $n_{\text{г}}^{\text{г}}$ – число рабочих смен в году, шт.;
 $Q_{\text{см}}^3$ – производительность экскаватора в смену, м³/смена;
 v_{Φ} – скорость подвигания фронта горных работ, м/год.

В соответствии с существующей взаимосвязью между скоростью горизонтального подвигания фронта горных работ (уступа) и углубкой карьера, скорость подвигания фронта работ будет определяться по следующей зависимости, м/год:

$$v_{\Phi} = \frac{Q_{\text{г}}^3}{\Phi_y h_y} \quad \text{или} \quad v_{\Phi} = \frac{Q_{\text{г}}^3 N_{3y}}{\Phi_y h_y}, \quad (8)$$

где Φ_y – длина фронта работ на уступе, м;
 N_{3y} – количество рабочих забоев (экскаваторов) на уступе, шт.

Оценка развития горных работ в карьере производилась с использованием блочной модели в программном комплексе GEOVIA Surpac и обработкой графической информации в системе САПР AutoCAD [16–18]. На базе блочной модели подготовлено 15 поперечных и 5 продольных разрезов карьера с шагом 250 м (рис. 4).

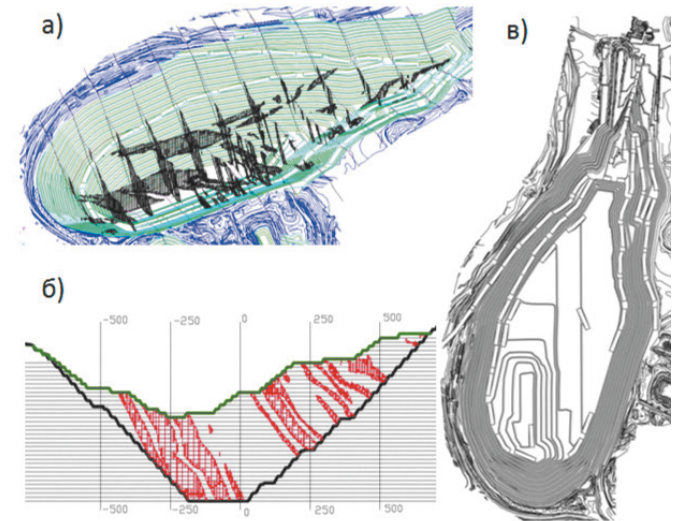


Рис. 4. Вид Центрального карьера АО «Карельский окатыш»: а – продольные и поперечные профили в изометрии (вид с восточной части карьера); б – характерный поперечный разрез в пределах Центрального карьера; в – план карьера на 2031 г. (в соответствии со стратегией развития) / Fig. 4. View of the Central quarry of Karelsky Okatysh JSC: a – longitudinal and transverse profiles in isometry (view from the eastern part of the quarry); b – characteristic cross section; within the Central Quarry; c – career plan for 2031 (in accordance with the development strategy)

Разработанная ИГД УрО РАН компьютерная программа позволяет оценить временные периоды и направления горных работ, в которых необходимо будет увеличить количество забойных экскаваторов для интенсификации добычи. Анализ производится во взаимосвязи с методикой компьютерного планирования за счет совместного оперирования исходными данными блочных и цифровых топографических моделей карьера при различных положениях горных работ.

Результаты исследований

Горно-геометрическим анализом блочной модели рудных тел в пределах конечных контуров Центрального карьера АО «Карельский окатыш», а также разрезов и погоризонтных планов положения горных работ (на 2022 г.) с использованием разработанного программного обеспечения установлено следующее:

- запасы руды в пределах Центрального карьера в основном расположены в верхней части на восточном участке месторождения, а также в глубинной зоне на западном участке (рис. 4а);
- основные запасы обрабатываемого участка месторождения сосредоточены на горизонтах +25 м ÷ –410 м (зона высотой 435 м, от поверхности глубина залегания зоны – 210 м); объем руды в пределах зоны составляет – 446,22 млн т (>93 % всей руды в предельных контурах карьера);
- на верхних 14 горизонтах (гор. +235 м ÷ +40 м) сосредоточен большой объем вскрышных пород – 64,4 млн м³, руды – 32,2 млн т, текущий коэффициент вскрыши при добыче составит до 2 м³/т;

– в соответствии со стратегией ГОКа коэффициент вскрыши на этих горизонтах должен составлять в среднем $0,99 \text{ м}^3/\text{т}$ (в два раза меньше), что практически недостижимо и является одним из возможных рисков выполнения программы развития горных работ;

– основные балансовые запасы руды на период реализации стратегии сосредоточены от гор. -25 м до гор. -410 м в объеме 107 млн т (добыча с коэффициентом вскрыши – $0,58 \text{ м}^3/\text{т}$);

– вскрышные породы в основном сосредоточены в пределах горизонтов 155 м ÷ 235 м (зона высотой 390 м);

– объем вскрыши в пределах выделенной зоны составляет 240 млн м^3 (>73 % всей вскрыши в предельных контурах карьера);

– на горизонтах +235 м ÷ +190 м находится значительный объем вскрышных пород в объеме 2 400 тыс. м^3 , который будет необходимо убрать для реализации плана развития горных работ;

– с глубиной отработки прогнозируется тенденция к улучшению качества руды, а именно увеличивается содержание $\text{Fe}_{\text{маг}}$ с 17 % на гор. +195 м до 27 % на гор. -240 м ÷ -270 м, а также увеличивается объем балансовых запасов руды и сокращается объем вскрыши;

– выделены неактивные фронты большой протяженности вдоль центральной части Восточного борта карьера в пределах горизонтов +70 м ÷ -5 м, при этом общая длина неактивного фронта горных работ – 22,6 км, в том числе по руде – 5,9 км, по вскрыше – 16,7 км;

– соотношение фронтов свидетельствует о недостаточном количестве рабочего оборудования для создания необходимых резервов готовых и подготовленных к выемке запасов.

По результатам исследований рассмотрены варианты разработки карьера со среднегодовым объемом добычи руды в 17 млн т и вскрыши ~ 18 млн м^3 до 2031 года.

Для реализации базового варианта стратегии развития ГОКа предлагается верхние горизонты юго-западного участка Центрального карьера поставить в предельное положение. После этого горные работы рекомендуются развивать в восточном направлении отдельными участками: добычной и вскрышной частью рабочей зоны по всей высоте Восточного борта.

При этом достижение планового коэффициента вскрыши ($1,05 \text{ м}^3/\text{т}$) возможно в кратчайшие сроки с гор. +70 м.

Достижение планового коэффициента вскрыши возможно со следующих горизонтов:

- западного участка карьера – с гор. +25 м;
- южного участка карьера – с гор. -110 м;
- северного участка карьера – с гор. +40 м.

Для достижения целей интенсификации горных работ на Центральном карьере потребуется увеличить парк забойных экскаваторов типа ЭКГ-10 на 2 единицы дополнительно к существующему парку в 10 единиц. При этом к 2031 году все уступы выше гор. -50 м должны быть погашены до проектного контура.

Со вводом в 2023 году в строй комплекса ЦПТ весь объем добываемой руды и вскрыши подается через него, для этого на гор. +35 м формируется концентрационный горизонт.

На рисунке 6 представлен фрагмент разработанной ИГД УрО РАН блочной модели Центрального карьера на 10-й год реализации базового варианта с формированием автомобильных съездов для снабжения комплекса ЦПТ (на гор. +35 м).

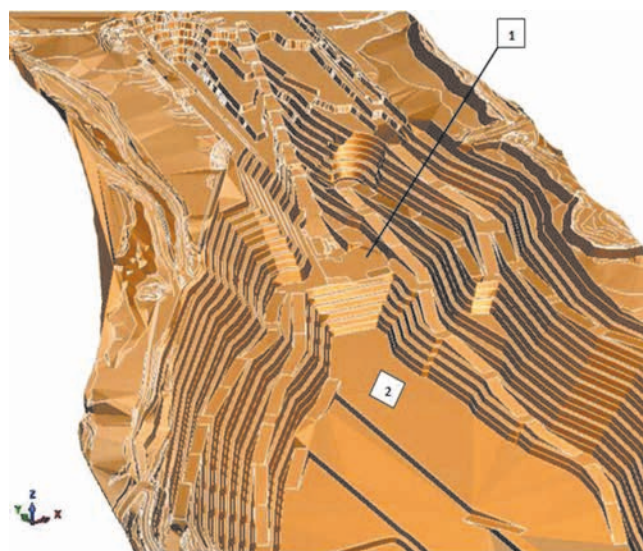


Рис. 6. Фрагмент блочной модели Центрального карьера на 10-й год реализации базовой стратегии развития ГОКа: 1 – концентрационный гор. +35 м комплекса ЦПТ; 2 – рабочий гор. -50 м /

Fig. 6. A fragment of the block model of the Central Quarry in the 10th year of the implementation of the basic development strategy of GOK: 1 – concentration hill. +35 m of the CPT complex; 2 – working mountains -50 m

Выводы

1. Представленные материалы методики и разработанное на ее базе программное обеспечение позволяют в автоматизированном режиме оценить соотношение фронтов горных работ на рабочих горизонтах карьера.

2. Анализ фронтов горных работ по типу и качеству запасов при различных положениях рабочей зоны позволяет провести аудит резервов интенсификации горного производства и своевременно выполнить корректировку режима работы карьера по руде и вскрыше в зависимости от потребностей рынка.

3. Комплексная аналитическая оценка горных работ с использованием разработанной методики позволяет определить следующие приоритетные направления интенсификации:

- обосновать резервы активных добычных фронтов по горизонтам рабочей зоны карьера;
- оптимизировать расстановку экскаваторов по горизонтам и создать условия для повышения их производительности;
- выделить узкие (проблемные) места в геометрии карьерных полей, ограничивающих развитие горных работ при их понижении.

4. Использование методики способствует снижению трудоемкости и повышению эффективности процессов планирования горных работ в карьерах, разрабатывающих сложноструктурные месторождения. Более качественное планирование горных работ с учетом свойств минерального сырья позволяет увеличить степень извлечения ценных компонентов и комплексное использование минеральных ресурсов.

5. Использование представленной методики и разработанного программного обеспечения не требует наличия на ГОКе современных средств ГГИС и специализированных программных продуктов. Для их применения достаточно офисных пакетов программ (Excel или аналогов) и редактора dxf-файлов с целью интерпретаций данных исследований. Реализация вышеизложенного комплекса методик позволяет

повысить эффективность планирования горных работ без приобретения дорогостоящих программ и дополнительного обучения пользователей, что может быть востребовано для малых предприятий и карьеров.

6. Предложенная методика актуальна в условиях импорто-

замещения программных продуктов и позволяет определить резервы горного производства; установить преобладающий технологический сорт рудного сырья в пределах анализируемых участков месторождения; выбрать рациональный способ добычи сырья с учетом его качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Быховский ЛЗ, Тигунов ЛП. Стратегическое минеральное сырье: пути решения проблемы дефицита. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2015; 5: 43-49. [Bykhovsky LZ, Tiginov LP. Strategic mineral raw materials: ways to solve the shortage problem. *Mineral Resources of Russia. Economics and management*. 2015; 5: 43-49. (In Russ.)].
2. Арсентьев АИ. Производительность карьеров. Санкт-Петербург, 2002: 85. [Arsentiev AI. Productivity of quarries. St. Petersburg, 2002: 85 (In Russ.)].
3. Моссаковский ЯВ. Экономика горной промышленности. Москва, 2015: 525. [Mossakovsky YaV. Economics of the mining industry. Moscow, 2015: 525. (In Russ.)].
4. Кантемиров ВД. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014; 6: 369-373. [Kantemirov VD. Technological features of the development of new raw material bases. *Mining information and analytical bulletin*. 2014; 6: 369-373. (In Russ.)].
5. Debashish D, Abhiram KV. Fundamentals and Applications of Rock Mechanics. New Delhi: PHI Learning, 2016: 412.
6. Кузнецов ОЛ, Никитин АА, Черемисина ЕН. Геоинформатика и геоинформационные системы. Москва, 2005: 453. [Kuznecov OL, Nikitin AA, Cheremisinina EN. Geoinformatics and geoinformation systems. Moscow, 2005: 453 (In Russ.)].
7. Кантемиров ВД, Яковлев АМ, Титов РС. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. 2020; 3: 29-37. [Kantemirov VD, Yakovlev AM, Titov RS Evaluation of qualitative indicators of minerals using geoinformation technologies of block modeling. *Geoinformatics*. 2020; 3: 29-37. (In Russ.)].
8. Ларионова ОБ, Пилугина ТП. Особенности компьютерной графики. *Альманах современной науки и образования*. 2008; 1: 116-118. [Larionova OB, Pilyugina TP. Features of computer graphics. *Almanac of modern science and education*. 2008; 1: 116-118. (In Russ.)].
9. Демьянов ВВ, Савельева ЕА. Геостатистика: теория и практика. Москва, 2010: 327. [Demyanov VV, Saveleva EA. Geostatistika: teoriya i praktika. Moscow, 2010: 327. (In Russ.)].
10. Mohammadpour M, Bahroudi A, Abedi M., et al. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019; 200: 13-26.
11. Яковлев АМ. Апробация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; 5-1: 248-257. [Yakovlev AM. Approbation of algorithms for automated processing of geological databases in technological schemes for quality management of mineral raw materials. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 5-1: 248-257. (In Russ.)].
12. Илимбетов АФ, Рыльникова МВ, Радченко ДН и др. Новые решения проблемы комплексного освоения рудных месторождений. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2006; 4 (16): 8-13. [Ilimbetov AF, Rylnikova MV, Radchenko DN, et al. New solutions to the problem of integrated development of ore deposits. *Bulletin of the Moscow State Technical University named after G.I. Nosov*. 2006; 4 (16): 8-13. (In Russ.)].
13. Asad M. W. A. Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 2005; 19 (3): 176-187.
14. Clementini E, Di Felice P, van Oosterom P. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. *Advances in Spatial Databases: Third International Symposium SSD '93 Singapore, June 23-25*. Singapore, 1993.
15. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014; 13 (3): 941-962.
16. Marques DM, Joao F. C. Choosing a proper sampling interval for the ore feeding a processing plant: A geostatistical solution. *International Journal of Mineral Processing*. 2014; 131: 31-42.
17. Afzal P, Madani N, Shahbeik S, et al. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration – Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. 2015; 158: 10-21.
18. Mery N, Emery X, Caceres A, et al. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit. *Ore Geology Reviews*. 2017; 88: 336-351.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Валерий Данилович Кантемиров –
канд. техн. наук, заведующий лабораторией
управления качеством минерального сырья,
ФГБУН «Институт горного дела» УрО
РАН, 620075, г. Екатеринбург, Российская
Федерация, e-mail: ukrkant@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6486-2740>



ABOUT THE AUTHORS

Valery D. Kantemirov –
Cand. Sci. (Eng.), Quality management laboratory
chief, Institute of Mining, Ural Branch of
the Russian Academy of Sciences, 620075,
Yekaterinburg, Russian Federation,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6486-2740>



Андрей Михайлович Яковлев –
канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством
минерального сырья, ФГБУН «Институт
горного дела» УрО РАН, 620075,
г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: krissy-puh@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8285-6387>

Andrei M. Yakovlev –
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Quality
management laboratory, Institute of Mining,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
620075, Yekaterinburg, Russian Federation,
e-mail: quality@igduran.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8285-6387>



Роман Сергеевич Титов –
старший научный сотрудник, лаборатория
управления качеством минерального сырья,
ФГБУН «Институт горного дела» УрО
РАН, 620075, г. Екатеринбург, Российская
Федерация, e-mail: ukr07@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3569-2743>

Roman S. Titov –
Senior Researcher, Quality management laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences, 620075, Yekaterinburg,
e-mail: ukr07@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3569-2743>

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.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.06.2025.

Поступила после рецензирования: 27.07.2025.

Принята к публикации: 21.08.2025.

Article info

Received: 25.06.2025.

Revised: 27.07.2025.

Accepted: 21.08.2025.

ПАРАМЕТРЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ ДЛЯ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА

А. В. Матвеев✉

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,

г. Новокузнецк, Российская Федерация

✉ matveev-av@yandex.ru

Аннотация: Представлены результаты исследований по обоснованию оптимальных параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат (ЭАКМЛ) для условий разрезов Кузбасса.

В работе решен ряд задач: разработана единая формула для определения производительности современных мехлопат с вместимостью ковша 6,3 до 55,8 м³ в зависимости от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород, высокая достоверность которой подтверждена при сравнении расчетных значений с хронометражными, полученных на разрезах в результате опытно-промышленной проверки; разработаны алгоритм и методика определения оптимальных параметров ЭАКМЛ; установлены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат на разработку одного кубометра вскрыши в условиях разрезов Кузбасса от величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы при применении мехлопат с вместимостью ковша 6,3 ÷ 55,8 м³ для III и IV категории пород; разработан экспресс-метод – номограмма для выбора типа экскаватора или их количества при проектировании или планировании горных работ.

В статье приведены значения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород III и IV категории ЭАКМЛ с вместимостью ковша 6,3÷55,8 м³ для условий разрезов Кузбасса, соответствующие оптимальным условиям ведения работ. Эти рекомендации и методический подход, представленный в работе, будут полезны как для проектировщиков, так и для плановиков горных предприятий. Использование результатов работы позволит определять оптимальные параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат при перевооружении карьера для повышения экономической эффективности добычи угля.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильный комплекс, механическая лопата, угольный разрез, вскрышные породы, буровзрывные работы, блок-схема алгоритма, средневзвешенный размер куска взорванной породы, эксплуатационная производительность, удельные эксплуатационные затраты

Благодарности: Автор выражает признательность док-ру техн. наук В. С. Федотенко, канд. техн. наук В. В. Чаплыгину, зав. кафедрой ОГРиЭ СибГИУ канд. техн. наук А. А. Садыкову за помощь при выполнении исследований.

Для цитирования: Матвеев АВ. Параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат для разрезов Кузбасса. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):31-40. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-31-40>.

PARAMETERS OF EXCAVATOR-AUTOMOBILE COMPLEXES USING MECHANICAL SHOVELS FOR KUZBASS SECTIONS

A. V. Matveev✉

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

✉ matveev-av@yandex.ru

Abstract: The article presents the results of studies to substantiate the optimal parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels (EAKML) for the conditions of the Kuzbass sections.

A number of tasks have been solved in the work: a unified formula has been developed to determine the performance of modern mechanical shovels with a bucket capacity of 6,3 to 55,8 m³ of the weighted average size of blasted rock pieces, the high reliability of which has been confirmed by comparing the calculated values with timing values obtained at the sections as a result of a pilot industrial inspection; an algorithm and methodology for determining the optimal parameters of EAKML was developed; graphical relationships were established between changes in the specific operating costs for the development of one cubic meter of overburden in the conditions of Kuzbass sections and the weighted average size of pieces of blasted rock when using mechlopat with a bucket

capacity of $6,3 \div 55,8 \text{ m}^3$ for rock categories IV and III; an express nomogram method was developed to select the type of excavator or their number in the design or planning of mining operations.

The article presents the values of minimum costs and replacement productivity of mechanical shovels in the development of overburden rocks of categories III and IV of EAKML with a bucket capacity of $6,3 \div 55,8 \text{ m}^3$ for the conditions of the Kuzbass sections corresponding to the optimal working conditions. These recommendations and the methodological approach presented in the work will be useful for both designers and planners of mining enterprises. The use of the results of the work will make it possible to determine the optimal parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels when re-equipping a quarry to increase the economic efficiency of coal mining.

Keywords: excavator-automobile complex, mechanical shovel, coal mine, overburden rocks, drilling and blasting operations, algorithm flow chart, weighted average piece of blasted rock mass, operational productivity, specific operating costs

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to Dr. Technical Sciences V. S. Fedotenko, Candidate of Technical Sciences V. V. Chaplygin, Head of the Department of OGRE SibGIU, Candidate of Technical Sciences A. A. Sadykov for assistance in carrying out research.

For citation: Matveev AV. Parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels for Kuzbass sections. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):31-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-31-40>.

Введение

Для выполнения вскрышных работ на разрезах Кузбасса широко применяются экскаваторно-автомобильные комплексы с использованием механических лопат (ЭАКМЛ) [1–3]. Более 80 % вскрышных пород разрабатывается с предварительным рыхлением буровзрывным способом и относятся к III и IV категориям по взрываемости.

Эффективность функционирования ЭАКМЛ существенно зависит от выбора параметров технологических процессов, начиная от подготовки горной массы к выемке и заканчивая укладкой породы в отвал [4].

Техническая характеристика применяемого оборудования ЭАКМЛ характеризуется довольно широким диапазоном параметров:

- механические лопаты оснащаются ковшами вместимостью от 6,3 до 55,8 м³,
- используются автосамосвалы грузоподъемностью от 55 до 360 тонн,
- диаметр буровых скважин варьируется от 170 до 270 мм,
- прием горной массы на отвалах и выполнение вспомогательных операций обеспечивается бульдозерной техникой различных модификаций.

Анализ результатов, выполненных ранее теоретических и экспериментальных работ по данной теме, показал, что решить задачу обоснования рациональных параметров ЭАКМЛ можно тогда, когда установлена зависимость изменения производительности механических лопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород [5–8].

Принимая во внимание указанные особенности работающего оборудования и специфику ведения горных работ, возникает объективная необходимость обоснования рациональных технологических решений применительно к условиям конкретного участка горных работ, а также в сравнительном анализе эффективности различных параметров процессов и типов оборудования всех звеньев технологической цепи.

Основным процессом исследуемой технологии является подготовка пород к выемке. Она характеризуется рядом параметров, такими как $d_{\text{св}}$ – диаметр скважин, $L_{\text{св}}$ – глубина скважин, сетка скважин (a , b , W), и еще таким параметром, как q – удельным расходом взрывчатых веществ (ВВ), изменение которого определяет издержки по процессу подготов-

ки горных пород к выемке буровзрывным способом (БВР). Критерием оценки процесса БВР принято считать величину $d_{\text{св}}$ – средневзвешенного размера кусков взорванных пород, который, как известно, характеризует производительность экскаватора, определяет величину коэффициента экскавации, а также время, затрачиваемое на набор ковша, эксплуатационную производительность экскаватора и величину затрат по процессу выемочно-погрузочных работ.

Эксплуатационная производительность Q экскаватора влияет на следующий производственный процесс – перемещение карьерных грузов. Чем больше объем горной массы в ковше, который за один цикл грузится экскаватором в автосамосвал, тем быстрее он загружается и, следовательно, необходимо больше автомобилей N_a для транспортировки на требуемое расстояние.

Производительность автотранспорта Q_a , рассчитанная исходя из грузоподъемности P и дальности транспортирования $L_{\text{тр}}$ горной массы, определяет затраты на эксплуатацию автотранспорта $C_{\text{тр}}$.

Количество бульдозеров N_b и их тип определяет затраты на процесс отвалообразования C_b , зависит от эксплуатационной производительностью экскаватора и схемы организации работ.

Средневзвешенный размер кусков взорванной породы служит важным критерием эффективности всей технологической цепи, позволяя согласовать между собой параметры процессов технологии ведения горных работ ЭАКМЛ (рис. 1).

Величина средневзвешенного размера куска является основным фактором, позволяющим определять параметры технологии, а сопоставляя варианты – выбрать тот, который обеспечивает минимум суммарных затрат по процессам в конкретных условиях работы комплекса.

Таким образом, задаваясь величиной средневзвешенного размера куска взорванных пород $d_{\text{св}}$, определяются соответствующие параметры процессов технологии разработки пород ЭАКМЛ и суммарные удельные затраты на разработку для конкретных горнотехнических условий угольного разреза. В результате перебора различных значений $d_{\text{св}}$ может быть выбрана его величина, соответствующая минимуму совокупных удельных эксплуатационных затрат, а параметры процессов в этих условиях работы комплекса можно считать оптимальными.

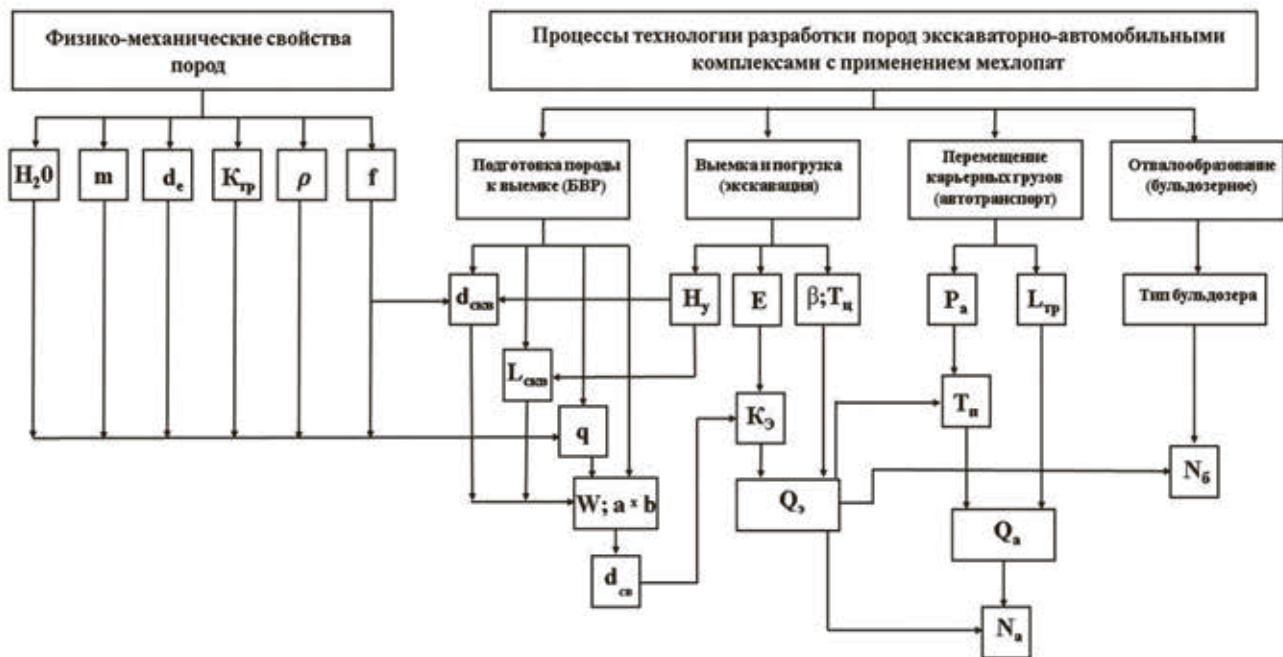


Рис. 1. Анализ влияния горнотехнических факторов на параметры процессов разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами /
Fig. 1. Analysis of the Impact of Mining Factors on the Parameters of Overburden Excavation Processes by Excavator and Automobile Complexes

Такой подход предполагает учет затрат всей технологической цепочки при разработке взорванных вскрышных пород современными экскаваторами – механической лопатой с последующим их транспортированием автосамосвалами и укладкой в бульдозерный отвал, что позволяет обеспечить минимизацию издержек для любых применяемых технических средств (оборудования) с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород при обеспечении безопасных условий эксплуатации.

Следовательно, главной целью исследований является разработка методики для расчета параметров работы экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат на разрезах Кузбасса, которая путем перебора различных значений $d_{св}$ позволяет определить параметры процессов в этих условиях работы комплекса, установить минимальные значения суммарных удельных эксплуатационных затрат и выбрать те параметры, которые обеспечивают минимум издержек при разработке вскрышных пород III и IV категории в конкретных условиях разрезов Кузбасса.

Основные задачи и методы исследований

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана единая формула для определения производительности современных мехлопат с вместимостью ковша 6,3 до 55,8 м³ в зависимости от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород, высокая достоверность которой подтверждена при сравнении расчетных значений с хронометражными, полученными на разрезах в результате опытно-промышленной проверки;
- разработаны алгоритм и методика определения оптимальных параметров ЭАКМЛ;
- установлены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат на разработку одного кубометра вскрыши в условиях разрезов Кузбасса от величины средневзвешенного размера кусков взорванной гор-

ной массы при применении мехлопат с вместимостью ковша 6,3 ÷ 55,8 м³ для III и IV категории пород;

– разработан экспресс метод – номограмма для выбора типа экскаватора или их количества при проектировании или планировании горных работ.

Принятая идея работы предполагает, что построением графической зависимости изменения суммарных удельных затрат на разработку полускальных вскрышных пород ЭАКМЛ от величины средневзвешенного размера кусков взорванной вскрышной породы, значения которого, соответствующие минимальным издержкам, определяют параметры каждого из процессов и производительность комплекса, совокупно обеспечивающие оптимальные параметры технологии. При этом совокупные издержки являются фактором, который определяет эффективность всего комплекса [9–10].

В таком случае целевую функцию математической модели для решения поставленной задачи оптимизации параметров ЭАКМЛ можно представить в виде

$$C_{бвр}f(d_{св}) + C_{э}f(d_{св}) + C_{м}f(d_{св}) + C_{о}f(d_{св}) = \sum C_{уд}f(d_{св}) \rightarrow \min, \text{ руб./м}^3, \quad (1)$$

где $C_{бвр}f(d_{св})$; $C_{э}f(d_{св})$; $C_{м}f(d_{св})$; $C_{о}f(d_{св})$ – удельные затраты соответственно на БВР, экскавацию, перемещение карьерных грузов и отвалообразование, руб/м³;

$\sum C_{уд}f(d_{св})$ – суммарные удельные затраты по всем основным процессам принятой технологии разработки, руб/м³.

Были проанализированы имеющиеся методики расчета производительности экскаваторов-мехлопат [11–17]. Установлено, что вид графических зависимостей изменения производительности механических лопат и коэффициента экскавации от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для всех типов экскаваторов с ковшом вместимостью от 6,3 до 55,8 м³, рассчитанные по известным в настоящее время методикам, значительно отличаются друг

от друга. Из-за этого возникла необходимость поиска иных подходов для установления зависимости изменения расчета производительности экскаваторов-мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород.

В этой связи представляют интерес исследования, одним из результатов которых является значение коэффициента экскавации K_3 для скальных и полускальных разрыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша от соотношения диаметра среднего куска взорванной горной массы (по объему) и вместимости ковша экскаватора кубообразной формы [18].

На следующем этапе исследований были определены эмпирические формулы для расчета K_3 для каждого типа современных мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород и получена общая (единая) зависимость [3, 12]:

$$K_3 = \frac{0,220 \cdot E^{0,234}}{d_{св}^n}, \text{ где } n = \frac{0,234}{E^{0,220}} \quad (2)$$

Статистическая обработка результатов расчета по полученной эмпирической формуле (2) показала достаточно высокую достоверность расчета коэффициента экскавации, что подтверждает диапазон изменения величин:

- среднего линейного отклонения – 0,005–0,069;
- среднеквадратического отклонения – 0,032–0,096 %;
- коэффициента вариации 7,52–18,12 % при среднем значении 12,3 %.

Подставив эмпирическую формулу для расчета коэффициента экскавации от средневзвешенного размера кусков взорванных пород в зависимость для расчета производительности механических лопат, установленную в 1976 году Н. Я. Репиным и соавторами [5], получим универсальную (для экскаваторов-мехлопат с ковшом вместимостью от 6,3 до 55,8 м³) расчетную эмпирическую формулу для определения величины сменной эксплуатационной производительности от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород:

$$Q_{см} = \frac{3600 \cdot E \cdot T_{см} \cdot \frac{0,22 \cdot E^{0,234}}{d_{св}^{0,22}} \cdot K_3 \cdot K_{ис}}{67 d_{св}^2 + \frac{E}{0,11E + 0,6} + \sqrt{\frac{(35 \cdot E + 0,42 \cdot E^2)^{\frac{5}{3}} \cdot \beta_n^2}{E}} + t_p}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (3)$$

где $T_{см}$ – продолжительность смены, ч; K_3 – коэффициент влияния параметров забоя; $K_{ис}$ – коэффициент использования экскаватора в течение смены; t_p – время разгрузки, с.

С целью подтверждения достоверности расчета по предложенной эмпирической формуле и сопоставления полученных результатов с существующими зависимостями была проведена опытно-промышленная проверка, которая определила фактическую производительность мехлопат в условиях разрезов Кузбасса.

Методический подход к проведению опытно-промышленной проверки состоял из нескольких последовательно реализованных этапов:

- сбора исходных данных о горнотехнических условиях работы, принятых параметров технологических схем и процессов;
- проведения хронометражных наблюдений, необходимых для определения реального показателя эффективности

использования рабочего времени экскаваторами при отработке взорванных блоков (коэффициент использования календарного времени $K_{кв}$);

– расчета величины средневзвешенного размера куска взорванной горной массы с применением специализированного программного комплекса BlastMaker.

При проведении хронометража работы экскаваторов для каждого взрывного блока формировалась карта распределения рабочего времени. Основной задачей проведенных измерений стало выявление точного значения коэффициента использования календарного времени $K_{кв}$ экскаватором.

Среднее значение коэффициента использования календарного времени при отработке блоков определялось следующим образом:

$$K_{кв} = \frac{[(V_1 K_{кв1}) + (V_2 K_{кв2}) + (V_3 K_{кв3})]}{V_1 + V_2 + V_3}, \text{ дол. ед.}, \quad (4)$$

где V_1, V_2, V_3 – объемы взрывающего блока, м³; $K_{кв1}, K_{кв2}, K_{кв3}$ – коэффициенты использования календарного времени при отработке блоков, дол. ед.

При этом сменная эксплуатационная производительность мехлопат определялась для каждого блока:

$$Q_{см1} = \frac{V_1}{T_{кал}} T_{см} K_{кв}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (5)$$

где $T_{кал}$ – календарный фонд времени, ч.

Среднее значение сменной эксплуатационной производительности мехлопат учитывает объемы каждого блока:

$$Q_{см} = \frac{[(V_1 Q_{см1}) + (V_2 Q_{см2})]}{V_1 + V_2}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (6)$$

где $Q_{см1}, Q_{см2}$ – сменная эксплуатационная производительность мехлопат, м³/см.

Величина средневзвешенного размера куска взорванной горной массы для каждого взрывного блока рассчитывалась посредством специального программного обеспечения BlastMaker. В ходе работы в данную программу вносили информацию о физико-механических свойствах разрабатываемых пород конкретного участка производства работ: плотности, пористости, коэффициенте крепости по шкале профессора М. М. Протодяконова, коэффициенте трещиноватости, блочности взрывающих пород. А далее – фактические параметры проведенных буровзрывных работ (глубину и диаметр скважин, схему размещения зарядов, тип и массу применяемого взрывчатого материала, конструкции зарядов, способы инициирования) [19].

Программа BlastMaker позволяет моделировать процесс разрушения массива породы взрывом, определять гранулометрический состав и величину средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы.

В результате проведенной работы были получены значения эксплуатационной производительности экскаваторов по различным формулам для условий конкретного предприятия и проведено сравнение с фактическими данными, полученными на разрезе (табл. 1).

С целью оценки предложенного подхода для определения эксплуатационной производительности мехлопат

Результаты опытно-промышленной проверки эмпирических зависимостей /
Results of Pilot Testing of Empirical Relationships

Тип ЭКГ / Excavator type	$d_{cp}, м$	Факт $Q_{э}, м^3/см$	По формуле Н. Я. Репина и др. / According to the formula N. Ya. Repin et al.				По формуле А. А. Сыроева и др. / According to the formula Syroeva A. A. et al.				По новой предлагаемой универсальной формуле / According to the new proposed universal formula			
			$Q_{э}, м^3/см$	Ошибка опыта, Δy	$ \Delta y^2 $	Относит. ошибка, $\Delta y / y_{ф}, \%$	$Q_{э}, м^3/см$	Ошибка опыта, Δy	$ \Delta y^2 $	Относит. ошибка, $\Delta y / y_{ф}, \%$	$Q_{э}, м^3/см$	Ошибка опыта, Δy	$ \Delta y^2 $	Относит. ошибка, $\Delta y / y_{ф}, \%$
ЭКГ-6,3	0,76	1752	3111	1359	1847532	77,6	3802	2050	4201184	117	2068	316	100070	18,1
ЭКГ-8	0,78	2520	4200	1680	2823664	66,7	4608	2088	4360119	82,9	2716	196	38250	7,8
ЭКГ-10	0,79	2688	5538	2850	8123644	106	5606	2918	8512316	108,5	3494	806	649060	30
ЭКГ-12	0,81	3348	6737	3389	11487427	101,2	6327	2979	8874514	89	4246	898	806027	26,8
ЭКГ-15	0,83	4572	8530	3958	15662158	86,6	7385	2813	7913485	61,5	5378	806	650133	17,6
ЭКГ-18	0,85	4716	10222	5506	30313349	116,7	8246	3530	12457477	74,8	6494	1778	3159712	37,7
ЭКГ-25	0,87	9960	14130	4170	17388823	41,9	10460	500	250462	5	9092	-868	754000	-8,7
РН-2800ХРС (33 м³)	0,89	14004	18198	4194	17587146	29,9	12544	-1460	2132480	-10,4	11963	-2041	4163755	-14,6
WK-45 (41,3 м³)	0,9	16512	22148	5636	31769389	34,1	14716	-1796	3226180	-10,9	14857	-1655	2740677	-10
РН-4100ХРС (55,8 м³)	0,92	21888	28260	6372	40607220	29,1	17670	-4218	17788282	-19,3	19641	-2247	5051069	-10,3
Среднее арифметическое по форм. у			12107		177610352		9136		69716499		7995		18112754	
Среднее линейное отклонение ($\Sigma \Delta y / n$)				3911				940				-201		
Средне- квадратическое отклонение			4442				2783				1419			
Коэффициент вариации, %					36,7				30,5				17,7	

и сравнения полученных результатов с существующими методиками был проведен анализ отклонений расчетных значений от фактических данных, полученных в производственных условиях угольных разрезов Кузбасса. Для количественной оценки указанных различий был использован статистический показатель – коэффициент вариации. Коэффициент вариации для значений производительности мехлопат по методике Н. Я. Репина и других и фактическими значениями производительности составляет 36,7 %, коэффициент вариации для значений производительности по методике А. А. Сыроева и других [6] составляет 30,5 %, коэффициент вариации для значений производительности по методике Ю. Г. Вилкула и В. В. Перегудова [8] составляет 35,2 %, коэффициент вариации для значений производительности по предложенной формуле составляет – 17,7 %.

Результаты исследований

Эмпирическая формула для определения величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от средневзвешенного размера кусков взорванных пород (3) является основой разработанной методики, которая позволяет решать следующие задачи при оптимизации параметров ЭАКМЛ:

- выбор величины удельного расхода ВВ в определенных условиях работы;
- выбор типа мехлопаты путем сравнения их технико-э-

кономических показателей по величине суммарных удельных затрат экскаваторно-автомобильного комплекса;

- выбор технических средств (бурового станка, автосамосвала и бульдозера) различной производительности и стоимости;

- комплексную задачу путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

Укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвалов, бурового станка и бульдозера представлена на рисунке 2.

В качестве методологической основы для оптимизации параметров ЭАКМЛ принят критерий минимизации – суммарные удельные эксплуатационные затраты на разработку вскрышных пород, учитывающих затраты, связанные с реализацией каждого из основных технологических процессов: подготовку горной массы к выемке, выемочно-погрузочные работы, транспортирование и отвалообразование.

Экономические показатели и использование информационных продуктов занимают важную часть в работе горнодобывающего предприятия [19, 21]. Фактические издержки на разработку вскрышных пород с применением ЭАКМЛ складываются из затрат по основным процессам технологии исследуемой технологии [22].

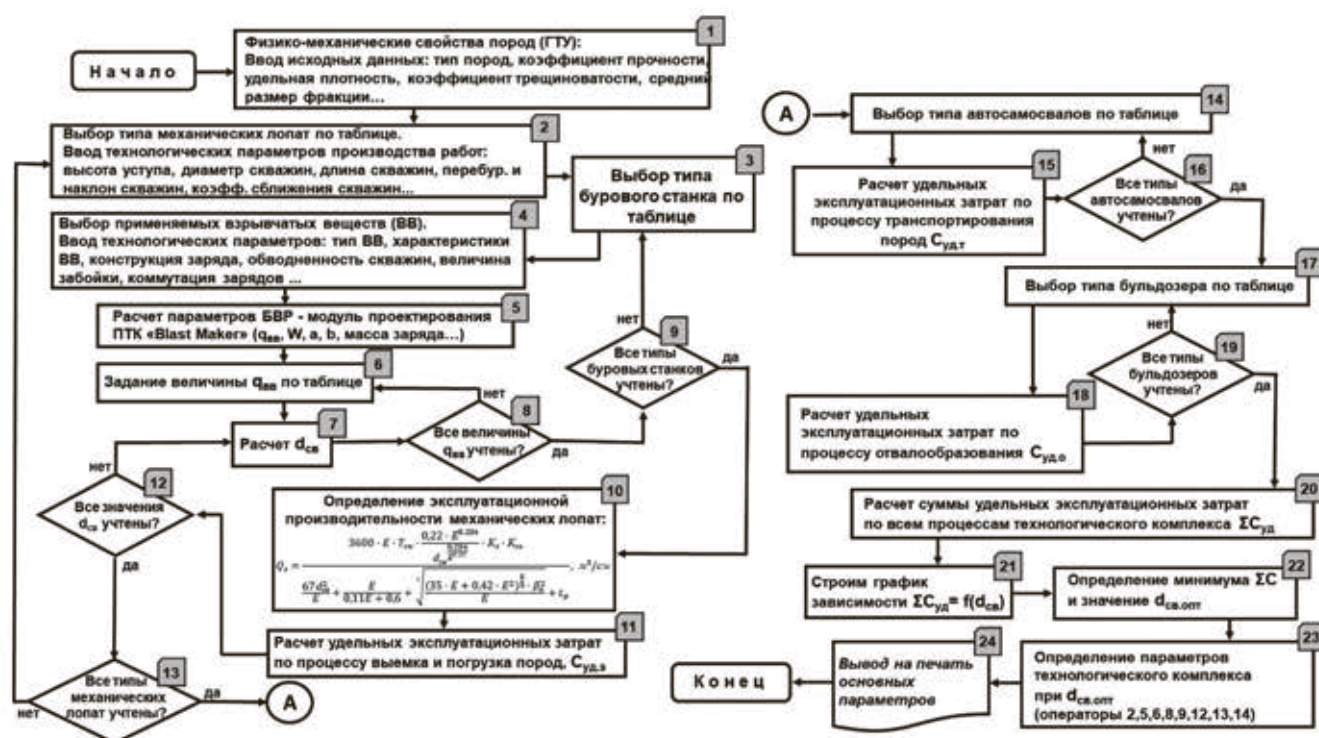


Рис. 2. Укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат через выбор удельного расхода взрывчатых веществ, типа механической лопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера /
Fig. 2. Enlarged block diagram of a complex algorithm for optimizing the parameters of EAKML through the selection of the specific consumption of explosives, such as a mechanical shovel, dump truck, drilling rig and bulldozer

Формирование альтернативных вариантов работы ЭАКМЛ осуществлялось путем перебора значений критерия $d_{св}$, величина которого позволяет определить параметры всех основных процессов технологии разработки пород экскаваторно-автомобильным комплексом, сравнивать различные варианты состава оборудования комплекса, рассчитать суммарные эксплуатационные издержки, определить зону наименьших издержек и по величине $d_{св}$ принять оптимальные параметры всех процессов.

Для определения минимума функции $\Sigma C_{уд} = f(d_{св})$ в работе были приняты восемь значений величины $d_{св}$ диапазоне от 0,125 до 1,000 м. При определении удельных затрат устанавливаются все основные параметры для каждого из принятых альтернативных вариантов, результаты фиксируются, а затем рассчитываются затраты на производство буровзрывных работ, работу выемочно-погрузочного оборудования, транспортирование и отвалообразование.

В результате были построены графики изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат при разработке вскрышных пород III и IV категории экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат при вместимости ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м³ в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, имеющие вид параболы. Зона ее минимальных значений определяет величину средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, величина которого позволяет установить оптимальные параметры всех основных процессов и имеет тенденцию пропорционального увеличения с ростом вместимости ковша для принятых типов экскаваторов от 0,525 до 1,000 м.

На рисунке 3 в качестве примера приведена графическая зависимость изменения суммарных удельных эксплуата-

ционных затрат всех процессов разработки пород IV категории ЭАКМЛ при применении мехлопаты ЭКГ-15. Графическая зависимость показывает, что при разработке пород IV категории экскаватором ЭКГ-15 минимум удельных затрат достигается при средневзвешенном размере куска 0,7 м и составляет 83,61 руб/м³. По значению средневзвешенного размера куска определяются все параметры основных процессов, обеспечивающие минимум затрат.

На основании полученных данных были рассчитаны минимальные удельные затраты на эксплуатацию и максимальная производительность механических лопат за смену, соответствующие оптимальным условиям ведения работ. Данные показатели представлены в таблице 2 и фактически являются ориентиром для реализации повышения экономической эффективности горнодобывающего предприятия путем снижения затрат при добыче полезных ископаемых.

Таким образом, анализируя графические зависимости изменения суммарных удельных затрат на разработку вскрышных пород III и IV категории экскаваторами-мехлопатами с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 м³, можно сказать, что они имеют квадратичную зависимость от средневзвешенного размера кусков взорванных пород, при этом по мере увеличения вместимости ковша экскаватора в принятом диапазоне минимум затрат смещается в сторону увеличения значения величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород от 0,525 до 1,000 м.

На основании данных, приведенных в таблице 2, методом степенной регрессии установлены формулы для определения минимальных удельных эксплуатационных затрат по всем процессам и сменной производительности механических лопат, которые представлены в таблице 3.

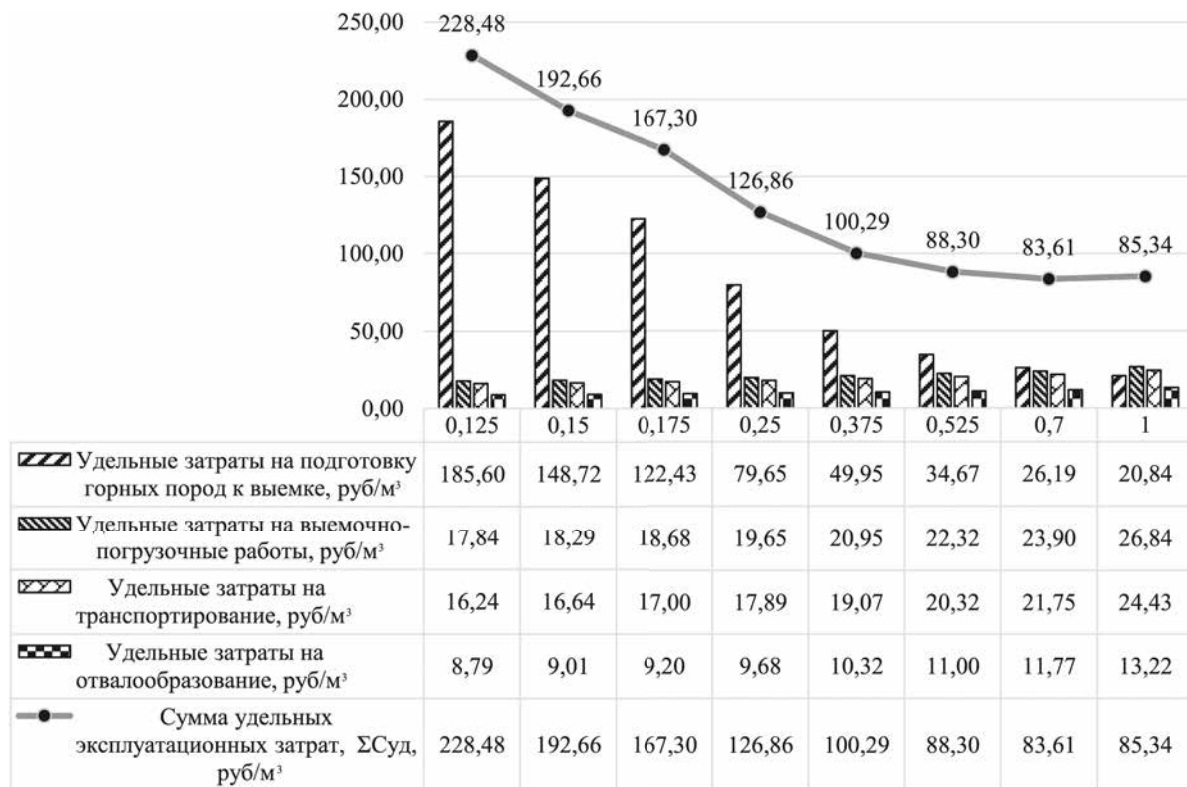


Рис. 3. Изменение удельных эксплуатационных затрат по основным процессам разработки пород IV категории при применении мехлопаты ЭКГ-15 /
Fig. 3. Change in specific operating costs for the main development processes of category IV rocks with the use of mechanical shovels EKG-15

Таблица 2 / Table 2

Минимальные удельные эксплуатационные затраты и сменная производительность механических лопат /
Minimum unit operating costs and replacement capacity of mechanical shovels

Гр. пород / Group of breeds	Параметр / Parameter	Экскаватор-мехлопата / Excavator mechanical shovel									
		ЭКГ-6,3	ЭКГ-8	ЭКГ-10	ЭКГ-12	ЭКГ-15	ЭКГ-18	ЭКГ-25	ЭКГ-33	ЭКГ-41,3	ЭКГ-55,8
III	d_{cp} , м	0,525	0,525	0,525	0,700	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Q_s , м³/см	2461	3177	4009	4463	5654	6173	8786	11683	14584	19402
	$Q_{з год}$, тыс. м³/год	1531	1976	2494	2776	3517	3839	5465	7267	9071	12068
	$\Sigma C_{уд}$, руб/м³	132,99	131,62	104,51	90,77	78,42	75,67	73,14	69,33	55,00	46,60
IV	d_{cp} , м	0,525	0,525	0,700	0,700	0,700	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000
	Q_s , м³/см	2461	3177	3662	4463	5654	6829	8786	11683	14584	19402
	$Q_{з год}$, тыс. м³/год	1531	1976	2278	2776	3517	4248	5465	7267	9071	12068
	$\Sigma C_{уд}$, руб/м³	139,93	138,55	110,25	95,96	83,61	81,95	80,00	76,19	61,86	53,46

Таблица 3 / Table 3

Формулы для определения минимальных удельных эксплуатационных затрат по всем процессам и сменной производительности механических лопат /
Formulas for determining minimum unit operating costs for all processes and replacement productivity of mechanical shovels

Гр. пород / Group of breeds	Расчетные формулы / Calculation formulas	Критерии оценки достоверности / Criteria for assessing reliability		
		Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации
-	$Q_s = 433,23 \cdot E^{0,94}$, м³/см	1,00	0,999	1,69 %
III	$\Sigma C_{уд} = 304,87 \cdot E^{-0,46}$, руб/м³	0,970	0,942	6,04 %
IV	$\Sigma C_{уд} = 294,15 \cdot E^{-0,42}$, руб/м³	0,964	0,929	6,13 %

Обсуждение результатов исследований, предложения по практическому применению

Разработанные эмпирические зависимости предоставляют возможность выбирать оптимальные типы и количество мехлопат на этапе проектных разработок для любого горно-

добывающего предприятия, учитывая планируемые объемы работ.

Номограмма, представленная на рисунке 4, позволяет оперативно осуществить выбор подходящего типа экскаваторов или сравнить варианты оснащения ЭАКМЛ для обе-

спечения требуемой производительности в заданных геолого-технических условиях конкретного разреза. Требуемую производительность 18 тыс. м³/см можно обеспечить одним или двумя экскаваторами. Стрелками показаны необходимые действия при разработке взорванной горной массы IV категории. При применении ЭКГ-55,8 затраты $\Sigma C_{уд} = 54,20$ руб/м³, при двух ЭКГ-25 $\Sigma C_{уд} = 78,00 \times 2 = 156,00$ руб/м³.

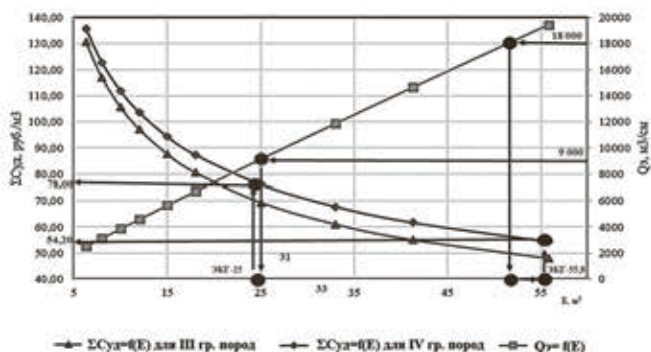


Рис. 4. Номограмма определения типа экскаваторов и количества экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат в условиях конкретного разреза в соответствии с требованиями по обеспечению плановой производительности /

Fig. 4. Nomogram for determining the type of excavators and the number of EAKML in a specific section in accordance with the requirements for ensuring planned productivity

При реализации в условиях Краснобродского угольного разреза рекомендованных в работе параметров технологии работы ЭАКМЛ с экскаватором ЭКГ-12 обеспечивается сокращение удельных эксплуатационных затрат на 1,54 руб/м³, что при годовой производительности комплекса 2 776 тыс. м³/год дает экономический эффект 4 275 тыс. руб/год.

Результаты проведенных исследований, представленные на конкурс «Лучший экспонат» XXXIII Международной специализированной выставки «Уголь России и майнинг», «Охрана, безопасности труда и жизнедеятельности», «Недра России», «Промтехэкспо», проходившей 3–6 июня 2025 года в г. Новокузнецке, были удостоены диплома и золотой медали.

Заключение

1. С помощью значений коэффициентов экскавации для скальных и полускальных разрыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша в зависимости от соотношения диаметра среднего куска взорванной горной массы (по объему) и вместимости ковша экскаватора кубообразной формы для каждого типа современных мехлопат с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м³ определены численные значения $K_0 = f(d_{св})$ (таблица 1), на основании которых была установлена эмпирическая формула зависимости $Q_0 = f(d_{св})$ (3). Эта зависимость позволила установить изменение величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для всех типов современных механических лопат.

2. Для проверки достоверности зависимости изменения величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от средневзвешенного размера кусков взорванных пород для всех типов современных механических лопат с результатами, достигнутыми на разрезах Кузбасса, проведена опытно-промышленная проверка.

Статистическая оценка зависимости изменения производительности экскаватора от средневзвешенного размера кусков взорванных пород с полученными результатами на разрезах Кузбасса показала достаточно высокую достоверность результата – коэффициент вариации составил 17,7 %.

3. Разработана методика оптимизации параметров ЭАКМЛ, основанная на построении графических зависимостей изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат на разработку вскрыши в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванных пород $d_{св}$, позволяет определить зону их минимальных значений, а по величине $d_{св}$ – параметры всех процессов, которые обеспечивают оптимальный режим работы с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород и организации работы комплекса. Методика позволяет произвести выбор величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

4. В соответствии с требованиями разработанного методического подхода к оптимизации параметров ЭАКМЛ для всех принятых мехлопат с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м³ в диапазоне изменения кусковатости взорванных пород от 0,125 до 1,000 м приняты восемь альтернативных вариантов величины средневзвешенного размера кусков $d_{св}$. Для каждого значения $d_{св}$ были определены основные параметры процессов и затраты по ним. Все результаты расчетов параметров процессов, затрат по каждому из них и суммарные издержки фиксировались в таблицах, чтобы при установлении значения $d_{св}$, при котором достигнут минимум $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$, принять эти параметры в качестве оптимальных для эксплуатации всего комплекса.

Суммарные удельные затраты на разработку вскрыши экскаваторами-мехлопатами с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 м³ имеют квадратичную зависимость от средневзвешенного размера кусков взорванных пород, при этом по мере увеличения вместимости ковша экскаватора в указанном диапазоне минимум затрат соответствует величине средневзвешенного размера кусков взорванных пород от 0,525 до 1,000 м.

5. Построены графики изменения удельных эксплуатационных затрат по процессам разработки пород III и IV категории. Установлены значения $d_{св}$, при которых достигнут минимум суммарных удельных эксплуатационных затрат $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$. Произведена выборка основных параметров процессов, установлена производительность ЭАКМЛ и затраты по ним для значений $d_{св}$, при котором достигнут минимум $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$.

6. Значения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород III и IV категории ЭАКМЛ в условиях разрезов Кузбасса приведены в таблице 2. В результате применения метода степенной регрессии для аппроксимации функций на основании данных таблицы 2 установлены и представлены в таблице 3 эмпирические расчетные формулы для определения минимальных суммарных издержек по основным процессам и соответствующая им сменная производительность, зависящая от величины вместимости ковша. Эти зависимости позволяют техническим службам разрезов и проектировщикам оперативно на стадии принятия решения с достаточной точностью определять состав ЭАКМЛ для конкретных условий разреза в соответствии с установленными требованиями по обеспечению плановой добычи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ненашев АС, Федотенко ВС, Федотенко НА Развитие и состояние применяемых видов технологии ведения горных работ и систем разработки на разрезах Кузбасса. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023; 3: 249-268. [Nenashev AS, Fedotenko VS, Fedotenko NA. The development and state of the applied types of mining technology and mining systems in the Kuzbass sections. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2023; 3: 249-268. (In Russ.)].
2. Ненашев АС, Федотенко ВС. Организационные условия высокопроизводительной работы мощных экскаваторно-автотранспортных комплексов на разрезах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2019; 6 (104): 49-52. [Nenashev AS, Fedotenko VS. Organizational conditions of high-performance operation of powerful excavator-motor transport complexes in sections. *Surveying and subsoil use*. 2019; 6 (104): 49-52. (In Russ.)].
3. Чаплыгин ВВ, Садыков АА, Матвеев АВ. К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 84-98. [Chaplygin VV, Sadykov AA, Matveev AV. On the issue of optimizing the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden rocks in the Kuzbass sections. *Mining information and analytical bulletin*. 2023; 9: 84-98. (In Russ.)].
4. Сермин ДС, Матвеев АВ, Лобанова ОО. Анализ качества взорванных горных пород на основе интегрального распределения энергии. *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: сб. трудов конф.* Новокузнецк, 2020: 210-212. [Sermin DS, Matveev AV, Lobanova OO. Analysis of the quality of blasted rocks based on the integral energy distribution. Science and youth: problems, searches, solutions: proceedings of the conference. Novokuzneck, 2020: 210-212. (In Russ.)].
5. Бирюков АВ, Репин НЯ, Паначев ИА и др. Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах. Москва, 1976: 50. [Birjukov AV, Repin NYa, Panachev IA, et al. A temporary method for calculating the parameters of explosive rock stripping at coal mines. Moscow, 1976: 50 (In Russ.)].
6. Ташкинов АС, Сысоев АА, Ташкинов ИА. Сравнительная оценка производительности карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород. *Вестник КузГТУ*. 2009; 4: 17-20. [Tashkinov AS, Sysoev AA, Tashkinov IA. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Bulletin of KuzSTU*. 2009; 4: 17-20. (In Russ.)].
7. Кононенко ЕА, Исайченков АБ. Влияния кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Bucyrus 495HD. *Маркшейдерия и недропользование*. 2014; 6: 17-19. [Kononenko EA, Isajchenkov AB. The impact of the lumpiness of blasted rocks on the performance of the Bucyrus 495HD excavator. *Surveying and subsoil use*. 2014; 6: 17-19. (In Russ.)].
8. Вилкул ЮГ, Перегудов ВВ. Влияние гранулометрического состава взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы карьеров. *Криворожский технический университет, разработка рудных месторождений*. 2011; 94: 3-7. [Vilkul JuG, Peregudov VV. The influence of the granulometric composition of the exploded rock mass on the technical and economic performance of quarries. *Krivoy Rog Technical University, development of ore deposits*. 2011; 94: 3-7. (In Russ.)].
9. Кузнецов АГ. Оптимизация стратегического планирования развития уранодобывающей отрасли на основе экономико-математического моделирования. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2011; 4: 39-45. [Kuznecov AG. Optimization of strategic planning for the development of the uranium mining industry based on economic and mathematical modeling. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2011; 4: 39-45. (In Russ.)].
10. Гилярова АА. Концепция объектно-ориентированной бизнес-модели инвестиционного горнорудного проекта. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2019; 10-1 (56): 88-92. [Giljarova AA. The concept of an object-oriented business model of an investment mining project. *Economics and Business: theory and practice*. 2019; 10-1 (56): 88-92. (In Russ.)].
11. Казангапов АЕ, Куттыбаев А Е, Саменов Г и др. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере. *Вестник КазНТУ*. 2006; 2: 153-156. [Kazangapov AE, Kutybaev AE, Samenov G, et al. Dependence of excavator performance on the lumpiness of the blasted rock at the Zhitikarinsky quarry. *Bulletin of KazNTU*. 2006; 2: 153-156. (In Russ.)].
12. Федотенко ВС, Чаплыгин ВВ, Матвеев АВ. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024; 1: 17-31. [Fedotenko VS, Chaplygin VV, Matveev AV. Optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden by excavator-automotive complexes using mechlopat. *Mine Surveying and subsoil use*. 2024; 1: 17-31. (In Russ.)].
13. Артяева МА. Стоимостной подход при управлении увеличения ценности компании. *Инновации в науке: пути развития: мат-лы X Всерос. науч.-практ. конф., 26 дек. 2018 г.* Чебоксары, 2018: 203-205. [Artyaeva MA. A cost-based approach to managing increasing the value of a company. *Innovations in science: ways of development: mat-ly X All-Russian Scientific and Practical conference. December 26th. 2018*. Cheboksary, 2018: 203-205. (In Russ.)].
14. Kovalchuk VA, Kovalchuk TM. The economic-mathematical modeling of the optimal structure of investment of a mining and dressing enterprise. *Business Inform*. 2020; 2 (505): 104-108.
15. Vysochyn I, Sytnyk H, Zhuk, et al. Information for enterprise management in Economics 4.0. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2022; 3: 141-145.
16. Galkina NV, Kravchuk IL, Solin AV et al. An approach to the economic assessment of production risk at a mining enterprise. *News of the Ural state mining university*. 2022; 4: 151-158.
17. Wang, X. Construction of economic management performance model of mining enterprises under the background of supply-side reform. *Wseas transactions on business and economics*. 2023; 20: 2066-2076.
18. Ржевская СВ. Исследование разрыхляемости скальных и полускальных пород: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1979: 17. [Rzhevskaya SV. Study of loosening of rocky and semi-rocky rocks: author's abstract. diss. ... st. candidate of technical sciences. Moscow, 1979: 17. (In Russ.)].
19. Trushina GS. Mining enterprise performance strategy economic evaluation. *Ugol*. 2017; 3: 52-55.
20. Бусырев ВМ. Экономические основы рационального освоения минерально-сырьевых ресурсов недр. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019; 2: 75-82. [Busyrev VM. The economic foundations of the rational development of mineral resources of the subsoil. *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 2: 75-82. (In Russ.)].
21. Временные нормы технологического проектирования угольных и сланцевых разрезов ВНТП 2-92. Москва, 1993: 78. [Temporary norms of technological design of coal and shale sections of VNTP 2-92. Moscow, 1993: 78. (In Russ.)].
22. Кузнецов АГ, Кузнецова ЮА. Применение ускоренной амортизации для повышения эффективности инвестиционных проектов в горной промышленности. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2011; 1: 33-35. [Kuznecov AG, Kuznecova JuA. The use

of accelerated depreciation to improve the efficiency of investment projects in the mining industry. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2011; 1: 33-35. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Андрей Васильевич Матвеев –
старший преподаватель кафедры открытых горных
работ и электромеханики, ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет», 654007,
г. Новокузнецк, Российская Федерация,
e-mail: matveev-av@yandex.ru

ABOUT THE AUTHOR

Andrey V. Matveev –
Senior Lecturer of the Department of Open-pit Mining and
Electromechanics, Siberian State Industrial University,
654007, Novokuznetsk, Russian Federation,
e-mail: matveev-av@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.05.2025.

Поступила после рецензирования: 01.07.2025.

Принята к публикации: 27.07.2025.

Article info

Received: 20.05.2025.

Revised: 01.07.2025.

Accepted: 27.07.2025.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ИЛОНАКОПИТЕЛЕЙ УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК ГИДРОЭЛЕВАТОРНЫМИ ЗЕМСНАРЯДАМИ

А. А. Корякин✉

ФБУ «Территориальный фонд геологической информации
 по Сибирскому Федеральному округу», г. Новосибирск, Российская Федерация
 ✉ rtn-kaa@mail.ru

Аннотация: Разработан методический подход к определению условий, обеспечивающих устойчивую и безопасную работу гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения. Определены условия устойчивой и безопасной работы гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения. Разработан алгоритм расчета системы гидротранспорта, производительности и основных параметров этой технологии в зависимости от горнотехнических условий работы комплекса. Установлена производительность и зона использования гидроэлеваторного земснаряда УГБ-2М при разработке хвостов обогащения для каждого из технически возможных диаметров пульповода при различных горнотехнических условиях его эксплуатации – расстояний транспортирования гидросмеси и геодетической высоты ее подъема.

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

Для цитирования: Корякин А.А. Обоснование параметров технологии очистки илонакопителей углебогатительных фабрик гидроэлеваторными земснарядами. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):41-46. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-41-46>.

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF THE TECHNOLOGY OF PURIFICATION OF SILO ACCUMULATORS OF COAL-PROCESSING PLANTS BY HYDRAULIC ELEVATOR DREDGERS

A. A. Koryakin✉

Territorial Fund of Geological Information for the Siberian Federal District, Novosibirsk,
 Russian Federation
 ✉ rtn-kaa@mail.ru

Abstract: A methodological approach has been developed to determine the conditions that ensure the stable and safe operation of a hydraulic elevator dredger during the development of enrichment tailings. The conditions of stable and safe operation of a hydraulic elevator dredger during the development of enrichment tailings are determined. An algorithm has been developed for calculating the hydraulic transport system, performance and the main parameters of this technology, depending on the mining conditions of the complex. The productivity and the area of use of the UGB-2M hydraulic elevator dredger in the development of enrichment tailings for each of the technically possible diameters of the pulp duct under various mining conditions of its operation - the distances of transportation of the hydraulic mixture and the geodetic height of its lifting.

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

For citation: Koryakin AA. Substantiation of the parameters of the technology of purification of silo accumulators of coal-processing plants by hydraulic elevator dredgers. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):41-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-41-46>.

Введение

В настоящее время большое внимание потребителей уделяется качеству угольной продукции, что в значительной мере определяет увеличение доли обогащаемого угля [1–4] за счет введения в эксплуатацию обогатительных фабрик в Кузбассе. Одновременно с этим из-за повышения зольности добываемых углей и зачастую несовершенства технологии его извлечения из недр содержание мелких фракций в хвостах обогащения значимо возросло, а возможности эксплуатации существующих шламоотстойников являются недостаточными [4, 5].

В шламонакопители Кузбасса [6–8] уложено более 25 млн т отходов углеобогащения. Они загрязняют окружающую среду, занимают большие территории и рано или поздно после их заполнения шлам придется утилизировать.

В этой связи исследования по обоснованию технологии и оборудования для безопасной и эффективной разработки угольных шламов, намытых ранее в хвостохранилище, должны базироваться на передовом опыте разработки [9–13] и перемещения неконсолидированных пород способом гидромеханизации [14–16].

Анализ технологии и оборудования, которые применяются для разработки шламов из илонакопителей углеобогажительных фабрик, показал, что они не соответствуют свойствам разрабатываемых пород и малоэффективны. При этом научно обоснованных и четких рекомендаций до сих пор не предложено. Следовательно, обоснование технологии и технических средств для разработки шламов с целью их утилизации или захоронения является актуальной научно-практической задачей.

Целью работы является обоснование параметров гидромеханизированной технологии разработки и перемещения хвостов обогащения из илонакопителей углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов, работающих на трубопровод, который попеременно используется как пульповод и водовод.

Идея работы заключается в том, что безопасная технология разработки и перемещения хвостов обогащения из

иллонакопителей углеобогажительных фабрик с применением гидроэлеваторных земснарядов для их утилизации или захоронения может быть эффективно реализована путем выбора их параметров, которые соответствуют горнотехническим условиям эксплуатации с учетом физико-механических свойств разрабатываемых шламов.

Полученные результаты и их обсуждение

На основании анализа взаимосвязи критериев, характеризующих горнотехнические факторы, и основных параметров процессов гидромеханизированной технологии очистки шламонакопителей [12–14, 17, 18] разработан методический подход к определению условий, обеспечивающих устойчивую и безопасную работу гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения (рис. 1).

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

1. Величина действительной скорости перемещения пульпы в трубопроводе V_d должна быть не меньше критической $V_{кр}$. Это условие исключает заиливание (закупорку пульповода), возможность гидравлического удара и аварии, при этом учитывает физико-механические свойства гидросмеси хвостов [12].

2. Подача (производительность) гидротранспортной установки должна определяться по месту пересечения характеристик пульповода, построенного для определенного расстояния перемещения и геодезической высоты подъема пульпы и земснаряда [18].

Это условие позволяет учитывать горнотехнические условия работы оборудования и возможности земснаряда, что гарантирует устойчивую работу комплекса.

В соответствии с разработанным методологическим подходом, включающим вышеперечисленные условия, на основании современных и проверенных методик расчета гидрокомплекса разработан алгоритм определения величины фактической подачи гидроэлеваторного земснаряда при разработке хвостов обогащения, с учетом физико-механических



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

Fig. 1. The scheme of interrelation of criteria of mining conditions and the main factors of technological processes of technology of cleaning of sludge accumulators with the use of a dredger

свойств гидросмеси хвостов для различных расстояний перемещения пульпы и геодезической высоты ее подъема (рис. 2).

Разработанный алгоритм позволил определить параметры гидротранспорта методом построения характеристики

внешней сети, по точке пересечения которой с характеристикой земснаряда УГБ-2М определяем «рабочую точку» то есть фактическую его производительность для различных горнотехнических условий эксплуатации.

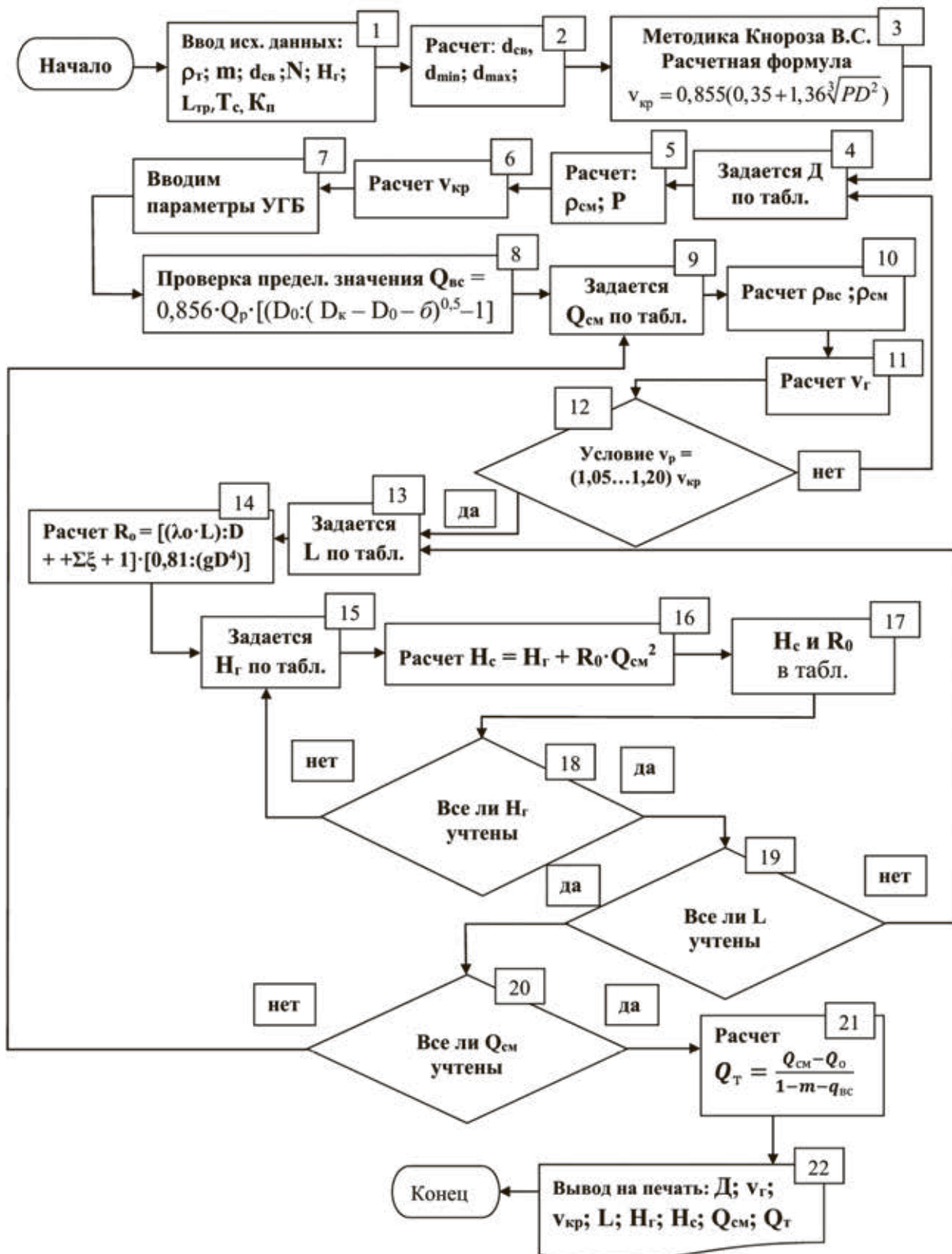


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета параметров системы гидротранспорта технологии очистки илонакопителя углеобогажительных фабрик с применением гидрозлеварных земснарядов и его производительности в зависимости от горнотехнических условий его работы / Fig. 2. Block diagram of the algorithm for calculating the parameters of the hydraulic transport system of the technology of cleaning the silo accumulators of coal-processing plants using hydraulic elevator dredgers and its performance depending on the mining conditions of its operation [16]

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

Фактическая (эксплуатационная) производительность земснаряда УГБ-2М для конкретных условий может быть рассчитана по известной формуле

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{т}} \cdot N \cdot T_{\text{см}} \cdot n \cdot K_{\text{и}}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{т}}$ – фактическая часовая производительность земснаряда по твердому, м³/ч;

N – количество рабочих дней за сезон для Кузбасса – 200–220 (принимая 210);

$T_{\text{см}}$ – время смены – 12 часов;

n – число смен работы в сутки – 2;

$K_{\text{и}}$ – коэффициент использования земснаряда – 0,8.

Для условий ОФ «Черниговская», на основании рассчитанных по алгоритму значений величины часовой производительности по твердому (шламу) установлена совокупность значений эксплуатационной производительности земснаряда УГБ-2М при диаметрах пульповода 0,30; 0,35; 0,40; 0,45 м и расстояниях транспортирования гидросмеси от 300 до 2000 м при геодезической высоте подъема пульпы от 0 до 20 м (табл.).

Заключение

Предлагаемый методический подход к определению параметров системы гидротранспорта технологии очистки илонакопителя углеобогажительных фабрик с применением земснаряда, реализованный в разработанном алгоритме, позволил установить производительность установки УГБ-2М для каждого из технически возможных диаметров пульповода (от $D = 0,30–0,45$ м) при различных горнотехнических условиях его эксплуатации – расстояний транспортирования гидросмеси и геодезической высоты ее подъема. При этом соблюдены условия, обеспечивающие устойчивую и безопасную работу гидроэлеваторного земснаряда. На основании произведенных расчетов фактически установлена зона технического использования гидроэлеваторных земснарядов УГБ-2М при разработке хвостов обогащения.

Устойчивая безаварийная работа эжекторного земснаряда УГБ-2М, исключая возможность заиливания трубопровода, обеспечивается в пределах расстояния транспортирования гидросмеси от 300 до 2000 м. Геодезической высоты подъема гидросмеси $H_{\text{г}}$ не превышает значение 20 м. Величина сезонной производительности гидроэлеваторного снаряда УГБ-2М по шламу изменяется в диапазоне от 153 до 391 тыс. м³. Расчеты показали, что производительность земснаряда УГБ-2М при работе в условиях ОФ «Черниговская» обеспечит требуемую – 200 тыс. м³ за сезон.

Предложения по практическому применению

Установленные возможности гидроэлеваторного земснаряда позволяют обосновать рекомендации по совершенствованию работы водошламового комплекса гидротехнических сооружений ОФ разреза АО «Черниговец» с целью повышения эффективности его работы.

Таблица / Table

Годовая (за сезон) производительность гидроэлеваторного снаряда УГБ-2М по твердому (шламу) /
Annual (per season) performance of the UGB-2M hydroelevator projectile on solid (sludge)

Д, м / D, m	L, м / L, m	Производительность УГБ-2М, Q _г ; тыс. м³/год / Capacity of UGB-2M, Q _г ; m³/year				
		H _г = 0 м	H _г = 5 м	H _г = 10 м	H _г = 15 м	H _г = 20 м
0,30	300	344	290	237	173	-
	600	246	204	-	-	-
0,35	300	-	-	349	277	-
	600	-	330	277	215	-
	1 000	306	251	212	153	-
	1 500	235	192	-	-	-
	2 000	179	-	-	-	-
0,40	300	-	-	-	313	-
	600	-	-	352	285	-
	1 000	-	358	299	229	-
	1 500	349	307	248	184	-
	2 000	307	260	206	-	-
0,45	300	-	-	-	360	277
	600	-	-	-	327	243
	1 000	-	-	369	293	218
	1 500	-	391	330	260	176
	2 000	-	352	290	229	-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Суфиянов РШ, Каталымов АВ, Гольберг ГЮ. Экологический аспект основных направлений повышения эффективности ресурсосбережения в сфере топливпереработки. *Кокс и химия*. 2010; 2: 39-43. [Sufiyonov RSh, Katalymov AV, Golberg GYu. Ecological aspect of the main directions of increasing the efficiency of resource saving in the field of fuel processing. *Coke and Chemistry*. 2010; 2: 39-43. (In Russ.)].
2. Владимир Рашевский: «Обогащение угля – один из главных приоритетов стратегии СУЭК». *Уголь*. 2016; 8 (1085): 70. [Vladimir Rashevsky: «Coal enrichment is one of the main priorities of the SUEK strategy». *Coal*. 2016; 8 (1085): 70. (In Russ.)].
3. Ефимова НВ. Анализ состояния и основные тенденции добычи, обогащения и экологии потребления энергетических углей в России. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2017; 1: 83-91. [Efimova NV. Analysis of the state and main trends of mining, enrichment and ecology of consumption energy coals in Russia. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2017; 1: 83-91. (In Russ.)].
4. Жолобова ЮС, Сафронов АЕ, Куший НА, Савон ДЮ. Минимизация воздействия на окружающую среду при применении новых технологий обогащения углей и утилизации отходов добычи. *Горный журнал*. 2016; 5: 109-112. [Zholobova YuS, Safronov AE, Kushchy NA, Savon DYU. Minimization of environmental impact when using new technologies for coal enrichment and waste disposal. *Mountain magazine*. 2016; 5: 109-112. (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.18.
5. Харионовский АА, Данилова МЮ. О методических подходах к переходу предприятий угольной промышленности на систему нормирования сбросов загрязняющих веществ в водные объекты по технологическим показателям. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2018; 10 (130): 50-61. [Kharionovskiy AA, Danilova MYu. On methodological approaches to the transition of coal industry enterprises to a system of rationing discharges of pollutants into water bodies according to technological indicators. *Water Treatment. Water Preparation. Water Supply*. 2018; 10 (130): 50-61. (In Russ.)].
6. Ефимов ВИ, Сидоров РВ, Корчагина ТВ. К вопросу образования отходов производства от предприятий угольной отрасли в Кузбассе. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017; 1: 85-96. [Efimov VI, Sidorov RV, Korchagina TV. On the issue of production waste generation from coal industry enterprises in Kuzbass. *Mining Information-Analytical Bulletin*. 2017; 1: 85-96. (In Russ.)].
7. О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2014 г.: доклад департамента природных ресурсов и экологии Кемеровской области. Кемерово, 2015. [On the state and environmental protection of the Kemerovo Region in 2014: report of the Department of Natural Resources and Ecology of the Kemerovo Region. Kemerovo, 2015. (In Russ.)].
8. Белокопытов ПИ, Сазыкин ГП. Решение экологических проблем Кузбасса в проектах обогатительных фабрик. *ТЭК и ресурсы Кузбасса*. 2003; 4/13: 17-19. [Belokopytov PI, Sazykin GP. The solution of environmental problems of Kuzbass in the projects of enrichment plants. *Fuel-and-Energy Complex and Resources of Kuzbass*. 2003; 4/13: 17-19. (In Russ.)].
9. Серегин АИ, Горлов ЕГ. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008; 5: 241-244. [Seregin AI, Gorlov EG. Development of technological schemes for processing coal sludge into commercial products. *Mining Information-Analytical Bulletin*. 2008; 5: 241-244. (In Russ.)].
10. Горлов ЕГ, Серегин АИ, Ходаков ГС. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива. *Химия твёрдого топлива*. 2007; 6: 51-57. [Gorlov EG, Seregin AI, Khodakov GS. Conditions for the sale of sludge from coal mining and coal processing enterprises in the form of suspension fuel. *Chemistry of Solid Fuel*. 2007; 6: 51-57. (In Russ.)].
11. Мосилян АВ. Признаки отнесения накопителей гетерофазных отходов к гидротехническим сооружениям. *Управление техносферой*. 2021; 4 (2): 221-228. [Mosikyan AV. Signs of attribution of accumulators of heterophase waste to hydraulic structures. *Technosphere Management*. 2021; 4 (2): 221-228. (In Russ.)]. DOI: 10.34828/UdSU.2021.30.58.010.
12. Кононенко ЕА, Белоусов КС. Анализ работы и возможности гидроэлеваторного земснаряда в условиях карьера Тучковского комбината строительных материалов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009; 9: 210-214. [Kononenko EA, Belousov KS. Analysis of the operation and capabilities of a hydro-elevator dredger in the quarry of the Tuchkovsky combine of building materials. *Mining Information-Analytical Bulletin*. 2009; 9: 210-214. (In Russ.)].
13. Федотенко ВС, Корякин АА. Перспективы применения эжекторных земснарядов для очистки шламонакопителей обогатительных фабрик. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2022; 9: 15-28. [Fedotenko VS, Koryakin AA. Prospects for the use of ejector dredgers for cleaning sludge accumulators of concentrating factories. *Mining Information-Analytical Bulletin*. 2022; 9: 15-28. (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_15.
14. Поклонов ДА, Мироненко ИА, Федотенко ВС, Протасов СИ. Алгоритм определения диаметра насадок гидромониторов с учётом режима работы насосной станции. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020; 2 (138): 58-66. [Poklonov DA, Mironenko IA, Fedotenko VS, Protasov SI. Algorithm for determining the diameter of the nozzles of hydraulic monitors taking into account the operating mode of the pumping station. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020; 2 (138): 58-66. (In Russ.)]. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-2-58-66.
15. Шелоганов ВИ, Кононенко ЕА. Насосные установки гидромеханизации: учебное пособие для студентов специальности 170100 «Горные машины и оборудование». Москва, 1999: 81. [Sheloganov VI, Kononenko EA. Pumping Units of Hydromechanization: textbook for students of specialty 170100 "Mining Machines and Equipment". Moscow, 1999: 81. (In Russ.)].
16. Корякин АА. Производительность эжекторного земснаряда УГБ-2М при очистке шламонакопителя обогатительной фабрики. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022; 3 (119): 36-40. [Koryakin AA. Productivity of the UGB-2M ejector dredger when cleaning the sludge accumulator of the concentrating plant. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2022; 3 (119): 36-40. (In Russ.)].
17. Кнороз ВС. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод расчёта. *Известия ВНИИГ*. 1941; 30: 256. [Knoroz VS. Movement of Hydraulic Mixtures in Pressure Pipelines and Calculation Method. *Proceedings of VNIIG*. 1941; 30: 256. (In Russ.)].
18. Ялтаец ИМ. Гидромеханизированные и подводные горные работы. Москва, 2006: 515. [Yaltanets IM. Hydro-Mechanized and Underwater Mining Operations. Moscow, 2006: 515. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Артём Александрович Корякин –
директор Федерального бюджетного учреждения
«Территориальный фонд геологической информации по
Сибирскому федеральному округу», 630091,
г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: rtn-kaa@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.05.2025.

Поступила после рецензирования: 20.06.2025.

Принята к публикации: 03.07.2025.

Article info

Received: 11.05.2025.

Revised: 20.06.2025.

Accepted: 03.07.2025.

ABOUT THE AUTHOR

Artem A. Koryakin –
Director of the Territorial Fund of Geological Information for
the Siberian Federal District, Novosibirsk, Russian Federation,
630091, Novosibirsk, Russian Federation,
e-mail: rtn-kaa@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО БОЛЬШЕСЫРСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В. Е. Кисляков, А. С. Федотов[✉], Д. С. Снетков, А. В. Шварцкопф

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

✉ ar.fedotow@yandex.ru

Аннотация: Приведены результаты анализа условий Большесырского бурогоугольного месторождения в части определения уровня изменчивости характеристик с использованием статистических методов и их классификация. Результаты работы позволили обоснованно определить наиболее изменчивую характеристику месторождения для последующей разработки решений по ее регулированию. Выявлена зависимость изменения зольности, использование которой должно способствовать стабилизации потока продукции. Поставлены дальнейшие цели для исследований.

Ключевые слова: уголь, качественные характеристики, управление качеством угля, коэффициент вариации

Для цитирования: Кисляков ВЕ, Федотов АС, Снетков ДС, Шварцкопф АВ. Исследование пространственной изменчивости горно-геологических условий и показателей качества полезного ископаемого Большесырского бурогоугольного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):47-52. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-47-52>.

STUDY OF SPATIAL VARIABILITY OF QUALITY INDICATORS OF THE BOLSHESYRSKOYE LIGNITE COAL DEPOSIT

V. E. Kislyakov, A. S. Fedotov[✉], D. S. Snetkov, A. V. Shwartzkopf

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University", Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ ar.fedotow@yandex.ru

Abstract: This paper presents the results of the analysis of conditions of the Bolshesyrskoye lignite coal deposit in terms of determining the level of variability of characteristics using statistical methods and provides their classification. The results of the work made it possible to reasonably determine the most variable characteristic of the deposit for the subsequent development of solutions for its regulation. The dependence of ash content change was revealed, the use of which should contribute to stabilization of the product flow. Further research goals are set.

Keywords: coal, quality characteristics, coal quality management, coefficient of variation

For citation: Kislyakov VE, Fedotov AS, Snetkov DS, Shwartzkopf AV. Study of spatial variability of quality indicators of the Bolshesyrskoye lignite coal deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):47-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-47-52>.

Введение

Исследованиями доказано, что качество добываемой продукции оказывает прямое влияние на величину показателей экономической эффективности освоения месторождения [13]. Кроме того, однородность потока добытого полезного ископаемого, поступающего из карьера (разреза), также влияет на величину эксплуатационных затрат. Чем

однородность потока ниже, тем больше затрат возникает в дальнейших технологических переделах для приведения продукции в более однородное состояние, особенно при поставке сырья нескольким потребителям с разным требованием [4].

Однородность потока добываемой продукции напрямую зависит от применяемой технологии, порядка отработки месторождения и непосредственно от уровня изменчивости ка-

качественных характеристик полезного ископаемого в недрах, которое уникально для каждой залежи. Для того чтобы иметь однозначное понимание о качественных характеристиках полезного ископаемого на конкретном объекте исследования, а именно диапазоне и характере изменчивости, а также закономерности изменения, необходимо детальное изучение показателей качества. Наличие исчерпывающей информации о характере изменчивости показателей качества позволит в дальнейшем наиболее точно обосновать параметры ведения горных работ и способов усреднения. Для получения результатов достаточно изучения материалов по результатам детальной геологической разведки с использованием методов статистической оценки и современных инструментов визуализации.

Совместно с качеством полезного ископаемого существенное влияние на технологию и комплексную механизацию оказывает изменчивость горно-геологических условий месторождения. Поэтому не менее важным является наличие информации о диапазонах и степени изменчивости мощностей как полезного ископаемого, так и вскрышных пород.

Цель исследования: проведение анализа и оценки уровня изменчивости характеристик полезного ископаемого для дальнейшего обоснования и принятия технологических и технических решений, позволяющих максимально стабилизировать однородность добываемой продукции.

Основным исследуемым показателем принята зольность полезного ископаемого, как один из ключевых факторов, влияющих на уровень доходности предприятия, а следовательно, и на уровень инвестиционной привлекательности [5, 6].

Объект исследования: Большесырское бурогольное месторождение.

Предмет исследования: качественные характеристики угольного пласта и уровень их изменчивости.

Методика исследования

Методы

Основным методом исследования в рамках данной работы является анализ с применением встроенных функций различных программных комплексов, позволяющих оперативно решать поставленные статистические задачи, такие как построение графиков зависимости, диаграмм рассеяния, гистограмм распределения, получение уравнений зависимости.

Вторым используемым методом исследования является моделирование [7–9], с помощью которого ранее был создан цифровой двойник объекта исследования [10], полноценно описывающий изучаемое месторождение и тем самым позволяющий более обширно производить анализ не только по имеющимся данным разведочного бурения.

Определение уровня изменчивости или однородности по каждому исследуемому параметру допустимо оценивать с использованием статистической оценки.

Наиболее удобным показателем, демонстрирующим уровень однородности выборки, является коэффициент вариации, который можно определить по следующей формуле

$$K_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{\bar{K}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; $\bar{K}$ – среднее значение оцениваемого показателя,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

здесь

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где K_i – значение показателя в выбранной i -й пробе; n – количество угольных проб, используемых для вычисления.

В таблице 1 приведено описание совокупности характеристик, оцениваемых по коэффициенту вариации [11].

Таблица 1 / Table 1
Типизация выборки в зависимости от уровня изменчивости /
Sample typification depending on the level of variability

Значение коэффициента вариации, % / Variation coefficient value, %	Тип выборки / Sample type
10	Однородная
10–20	Достаточно однородная
20–33	Достаточно разнородная
>33	Разнородная

Таким образом, определяя коэффициент вариации для исследуемого показателя и рассматривая выборки разного объема, возможно дать сравнительную оценку каждой выборке по единому показателю однородности.

В качестве основных материалов и инструментов исследования для анализа и достижения поставленной цели использовано следующее:

- отчет о геологоразведке Большесырского бурогольного месторождения;
- блочная модель месторождения;
- встроенные функции пакета Microsoft Excel;
- встроенные функции ГГИС MicroMine.

Выбор исследуемых показателей

В качестве основных исследуемых показателей, подлежащих оценке на уровень их изменчивости, выбраны: мощность угольного пласта, мощность вскрышных пород, зольность угля. Параметры рассцениваются как наиболее доминирующие при выборе технологии отработки и дальнейшей эффективности освоения месторождений.

Степень изменчивости мощностей вскрышных пород и угольного пласта напрямую влияет на структуру комплексной механизации, порядок отработки и скорость продвижения горных работ. Однако указанными параметрами полезного ископаемого невозможно управлять, а только обосновывать технологию ведения работ, ее параметры и направление с целью получения наибольшей выгоды. При выдержанности мощностей вскрышных пород и полезного ископаемого повышение эффективности освоения за счет изменения параметров ведения горных работ (или направления развития) не принесет значительных результатов. Кроме того, необходимо отметить, что при сравнении базовых методик геометрического анализа [12] качество полезного ископаемого не учитывают при выборе направления развития горных работ. А сравнение и выбор вариантов производятся по соотношению объемов вскрышных и добычных работ. Хотя при достаточной выдержанности мощностей вскрышных пород и полезного ископаемого выбор направления отработки и обоснование параметров ведения горных работ с учетом изменчивости зольности позволит получать более высокий экономический эффект.

Поэтому для повышения эффективности необходимо рассмотреть возможность реализации продукции по более высоким ценам за счет повышения ее качества и однородности. Как правило, цены на уголь устанавливаются в зависимости от его калорийности, и чем она выше, тем выше цена реализации. Но и немаловажным фактором является *зольность угля*, за превышение которой договорами на поставку предусматриваются значительные штрафные санкции.

Анализ геологической информации по объекту исследования показал, что в более чем 90 % угольных проб определена зольность (более 1,5 тыс. определений зольности). А с учетом того, что калорийность и зольность имеют прямую зависимость, контроль и управление зольностью как одной из качественных характеристик позволит не только избежать штрафных санкций за поставку некачественного сырья, но и реализовывать продукцию по более высокой цене за счет более высокой калорийности.

Результаты исследований

Для определения уровня изменчивости для выбранных показателей проведены следующие действия:

- с использованием данных о мощности вскрышных пород по каждой скважине произведена их группировка (скважин) по интервалам мощности и построены диаграммы распределения для первоначальной оценки наличия изменчивости по исследуемым характеристикам;
- определен коэффициент вариации по формулам (1–3) для оценки уровня изменчивости (колебаний) оцениваемых параметров;
- произведена классификация выборки в соответствии с таблицей 1;
- сформулированы выводы на основании полученных данных.

Исследование изменчивости мощности вскрыши

Для исследования изменения мощности вскрыши приняты результаты геологоразведочного бурения, на основании которых построены соответствующие гистограммы и произведен дальнейший анализ.

На рисунке 1 представлена гистограмма распределения мощности вскрышных пород в границах исследуемой площади.

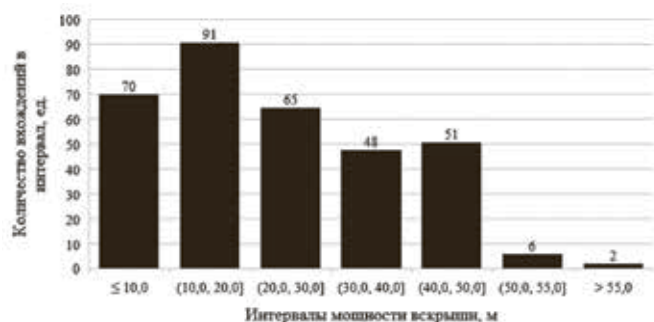


Рис. 1. Гистограмма распределения мощности вскрышных пород на Большесырском месторождении бурого угля в границах исследуемой площади /

Fig. 1. Histogram of distribution of overburden rock thickness at the Bolshesyrskoye lignite coal deposit within the boundaries of the study area

Для оценки изменчивости выборки были использованы

выражения (1–3). Классификация выборки по коэффициенту вариации приведена в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализа изменчивости мощности вскрышных пород в границах исследуемой площади / Results of the analysis of the variability of the overburden thickness within the boundaries of the study area

Интервал мощности вскрыши, м / Overburden thickness interval, m	Количество скважин в интервале / Number of drillholes in the interval	Среднее значение мощности вскрыши, м / Average value of overburden thickness, m	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	Тип выборки / Sample type
<10	70	7	25	Достаточно разнородная
10–20	91	14,9	21	Достаточно разнородная
20–30	65	24,7	11	Достаточно однородная
30–40	48	35	8	Однородная
40–50	51	44,5	6	Однородная
>50	8	52,5	3,5	Однородная
Средневзвешенное по выборке			15	Достаточно однородная

Исследование изменчивости мощности пласта

По аналогии с анализом изменчивости мощности вскрышных пород проведено исследование изменчивости мощности угольного пласта. На рисунке 2 представлена гистограмма распределения мощности угольного пласта в границах исследуемого участка.

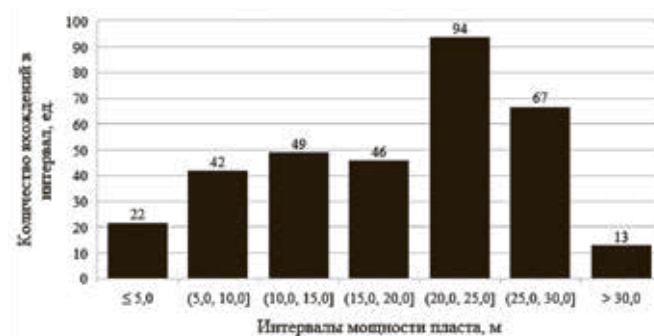


Рис. 2. Гистограмма распределения мощности угольного пласта на Большесырском месторождении бурого угля в границах исследуемого участка /

Fig. 2. Histogram of coal seam thickness distribution at the Bolshesyrskoye lignite coal deposit within the boundaries of the study area

Классификация выборки по коэффициенту вариации приведена в таблице 3.

Исследование изменчивости зольности

Используя известные формулы для определения степени изменчивости и на основании данных геологоразведочного бурения, была произведена оценка уровня изменчивости уровня зольности по интервалам мощности пласта.

На рисунке 3 представлена гистограмма распределения зольности в границах исследуемого пласта.

Таблица 3 / Table 3

Результаты анализа изменчивости мощности угольного пласта в границах исследуемого пласта /
Results of the analysis of the variability of the coal seam thickness within the boundaries of the studied seam

Интервал мощности пласта, м / Seam thickness interval, m	Количество скважин в интервале / Number of drillholes in the interval	Среднее значение мощности пласта, м / Average value of seam thickness, m	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	Тип выборки / Sample type
<5	22	3,2	29	Достаточно разнородная
5–10	42	7,5	17	Достаточно однородная
10–15	49	12,7	11	Достаточно однородная
15–20	46	17,6	8	Однородная
20–25	94	23,1	6	Однородная
25–30	67	26,5	4	Однородная
30–35	13	31,3	4	Однородная
Средневзвешенное по выборке			9,4	Однородная

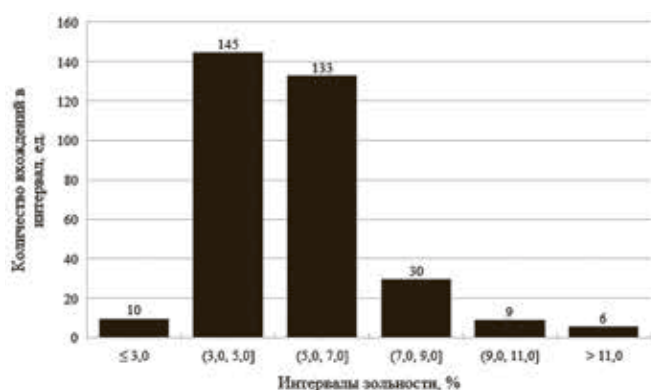


Рис. 3. Гистограмма распределения зольности на Большесырском месторождении бурого угля в границах исследуемого пласта /

Fig. 3. Ash content distribution histogram at the Bolshesyrskoye lignite coal deposit within the boundaries of the studied seam

Для увязки уровней зольности пласта с его мощностью классификация по коэффициенту вариации, приведенная в таблице 4, составлена с учетом разделения пласта на интервалы.

Приведенные результаты анализа демонстрируют высокую однородность исследуемой площади в части мощности вскрышных пород и угольного пласта, что является положительным фактором для разработки. При этом зольность по каждому исследуемому интервалу мощности пласта показывает высокую изменчивость, что осложняет процесс дальнейшей переработки продукции. В таких условиях возникает

необходимость реализации дополнительных мероприятий по усреднению угля для стабилизации потока продукции.

В результате детального анализа изменчивости зольности скважинам по части из них выявлена явная зависимость распределения зольности.

На рисунке 4 приведен наиболее наглядный пример найденной зависимости по выборке.

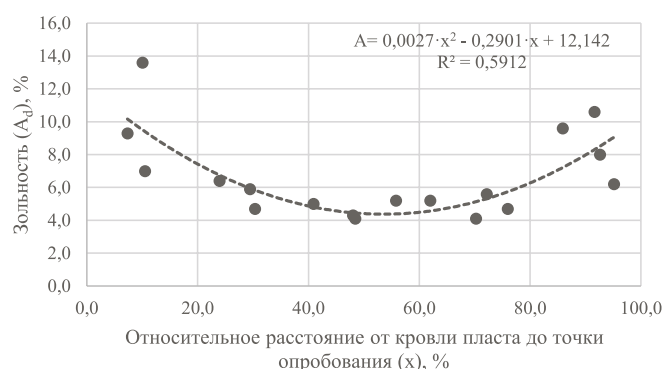


Рис. 4. Зависимость зольности от относительного расстояния от кровли / Fig. 4. Dependence of ash content on relative distance from the roof

Анализируя представленный график, можно сделать вывод, что по мере увеличения относительного расстояния от кровли уменьшается и зольность пласта. Далее, на определенном расстоянии от кровли возникает зона «стабильности» зольности, после чего зольность снова увеличивается.

Принимая во внимание данную зависимость, можно

Таблица 4 / Table 4

Результаты анализа изменчивости зольности угля в границах исследуемого пласта /
Results of the analysis of ash content variability in coal within the boundaries of the studied seam

Интервал мощности пласта, м / Seam thickness interval, m	Количество скважин в интервале / Number of drillholes in the interval	Среднее значение зольности, % / Average ash content, %	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	Тип выборки / Sample type
<5	22	7,3	38	Разнородная
5–10	41	6,1	43	Разнородная
10–15	50	5,9	36	Разнородная
15–20	47	5,5	35	Разнородная
20–25	94	5,3	38	Разнородная
25–30	67	5,5	41	Разнородная
3–35	12	5,1	38	Разнородная
Средневзвешенное по выборке			38,5	Разнородная

предположить, что выделение зоны пласта с наиболее стабильным уровнем зольности позволит повысить уровень однородности добываемого продукта за счет наиболее точной информации о качестве угля в конкретной оцениваемой точке при выборе направления развития и параметров горных работ.

Заключение

1. Проведенные исследования месторождения в части изменчивости характеристик пласта и вскрышных пород позволили охарактеризовать исследуемый объект как месторождение с достаточно выдержанными мощностями полезной толщины и покрывающих пород, но с достаточно изменчивым уровнем качества.

2. Нестабильный поток продукции, поступающей из карьера, требует реализации дополнительных мероприятий, направленных на стабилизацию уровня качества, что влечет за собой временные, технические, а следовательно, и экономические затраты, которые в итоге влияют на конечную стоимость продукции. А принимая во внимание тот факт, что в некоторых случаях качество продукции может ухудшаться на пути к потребителю [13, 14], стабилизация качества в потоке из карьера (разреза) становится еще более приоритетной задачей.

3. Использование выявленной зависимости в части изме-

нения зольности позволит выделять зоны пласта с наиболее постоянным уровнем качества, а дальнейшее обоснование направления развития горных работ с учетом выделенных зон позволит поставлять продукцию на склады с более стабильным уровнем, тем самым снизив затраты на усреднение на складах.

4. При наличии полной информации о качественных характеристиках полезного ископаемого по всей площади и в зависимости от его мощности имеется возможность выбирать направление развития и параметров горных работ таким образом, чтобы на выходе из разреза однородность потока продукции была максимальной.

5. Для дальнейшего развития данного направления исследования рекомендуется:

- провести анализ блочной модели месторождения и выделить зоны по площади распространения и мощности с более стабильным уровнем качества;

- осуществить анализ результатов и рассмотреть различные варианты направлений отработки и дать им оценку в части возможного режима горных работ, выбрать направление развития;

- обосновать наиболее целесообразную высоту уступа для сохранения однородности потока продукции с учетом полученных зависимостей и результатов, при этом сохранив эффективность использования выемочного оборудования [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азев ВА, Попов ДВ. Обоснование технологических параметров разработки пластовых месторождений с невыдержанными характеристиками залегания и качества угля. *Уголь*. 2022; 2: 14-21. [Azey VA, Popov DV. Justification of technological parameters for the development of bedded deposits with uneven characteristics of coal occurrence and quality. *Coal*. 2022; 2: 14-21. (In Russ.).] DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-14-21.
2. Субботин ЮВ, Овешников ЮМ, Самойленко и др. Управление качеством бурых углей Харанорского месторождения. *ГИАБ*. 2012; 4: 64-72. [Subbotin YuV, Oveshnikov YuM, Samoylenko AG, et al. Quality management of brown coals of the Kharanorskoye deposit. *GIAB*. 2012; 4: 64-72. (In Russ.).]
3. Ржевский ВВ. Технология и комплексная механизация открытых горных работ: Учебник. Изд. 2, перераб. и доп. Москва, 1975: 574. [Rzhevsky VV. Technology and complex mechanization of open-pit mining. Textbook. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, 1975: 574. (In Russ.).]
4. Якубовский ММ, Дребенштет К. Управление качеством бурого угля на карьере при наличии нескольких потребителей с различными требованиями к сырью. *Записки Горного института*. 2014: 90-94. [Yakubovsky MM, Drebenstedt K. Quality management of brown coal in a quarry in the presence of several consumers with different requirements for raw materials. *Notes of the Mining Institute*. 2014: 90-94. (In Russ.).]
5. Эпштейн СА, Шинкин ВК. Показатели качества угля для разных направлений. *ГИАБ*. 2022; 4: 5-16. [Epshteyn SA, Shinkin VK. Coal quality indicators for different directions. *GIAB*. 2022; 4: 5-16. (In Russ.).] DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_5.
6. Швабенланд ЕЕ, Лаптева МИ. Принципы управления качеством минерального сырья при комбинированной разработке сложноструктурных месторождений. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2021; 3: 326-335. [Shvabenland EE, Lapteva MI. Principles of quality management of mineral raw materials in the combined development of complex-structured deposits. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 3: 326-335. (In Russ.).]
7. Кантемиров ВД, Яковлев АМ, Титов РС. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021; 1: 63-73. [Kantemirov VD, Yakovlev AM, Titov RS. Application of geoinformation technologies of block modeling to improve methods for assessing the quality indicators of minerals. *News of higher educational institutions. Mining journal*. 2021; 1: 63-73. (In Russ.).] DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.
8. Яковлев АМ. Аprobация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством полезного ископаемого. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; 5-1: 248-257. [Yakovlev AM. Testing of algorithms for automated processing of geological databases in technological schemes for managing the quality of minerals. *Mining information and analytical bulletin*. 2021; 5-1: 248-257. (In Russ.).] DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_248.
9. Маниковский ПМ. Управление качеством углей по критерию их опасности с использованием цифровых моделей полезного ископаемого на Кутинском буроугольном месторождении. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2023; 29 (2): 8-23. [Manikovskiy PM. Coal quality management based on their hazard criteria using digital models of minerals at the Kutinsky brown coal deposit. *Bulletin of the Transbaikal State University*. 2023; 29 (2): 8-23. (In Russ.).] DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-8-23.
10. Кисляков ВЕ, Федотов АС, Снетков ДС, Шварцкопф АВ. Моделирование Большесырского буроугольного месторождения в горно-геологической информационной системе Micromine. *Успехи современного естествознания*. 2024; 11: 100-105. [Kislyakov VE, Fedotov AS, Snetkov DS, Schwarzkopf AV. Modeling of the Bolshesyrskoye brown coal deposit in the mining and geological information system Micromine. *Advances in modern natural science*. 2024; 11: 100-105 (In Russ.).] DOI: 10.17513/use.38339.

11. Полякова ВВ, Шаброва НВ. Основы теории статистики: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург, 2015: 148. [Polyakova VV, Shabrova NV. Fundamentals of the theory of statistics: textbook. allowance. 2nd ed., rev. and additional. Yekaterinburg, 2015: 148. (In Russ.)].
12. Трубецкой КН, Краснянский КЛ, Хронин ВВ. Проектирование карьеров: Учебник для вузов: В 2 томах. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 2001; I: 51. [Trubetskoy KN, Krasnyansky KL, Khronin VV. Design of quarries: Textbook. For universities: In 2 volumes. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, 2001; I: 519. (In Russ.)].
13. Гаврилов ВЛ. Управление качеством угля в динамической системе «Георесурс технологическое воздействие потребитель». ГИАБ. 2009; 12: 56-61. [Gavrilov VL. Coal quality management in the dynamic system "Georesource – technological impact-consumer". GИAB. 2009; 12: 56-61 (In Russ.)].
14. Гаврилов ВЛ. Анализ изменения качества угля в технологической цепочке «Забой – потребитель». ГИАБ. 2013; 5: 156-162. [Gavrilov V.L. Analysis of coal quality changes in the process chain "Slaughter-house – consumer". GИAB. 2013; 5: 156-162 (In Russ.)].
15. Шестаков ВА, Шмаленюк АА, Белодедов АА. Метод обоснования минимальной мощности разрабатываемых пластов с учетом качества угля. ГИАБ. 2003; 2: 87-89. [Shestakov VA, Shmalenyuk AA, Belodedov AA. Method of justifying the minimum thickness of developed seams taking into account the quality of coal. GИAB. 2003; 2: 87-89. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Евгеньевич Кисляков –

доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Артём Сергеевич Федотов –

аспирант кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: ar.fedotow@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9552-2956>

Дмитрий Сергеевич Снетков – кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Андрей Валериевич Шварцкопф – аспирант кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Критерии авторства / Contribution:

Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи / The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.04.2025.

Поступила после рецензирования: 04.07.2025.

Принята к публикации: 11.07.2025.

Article info

Received: 16.04.2025.

Revised: 04.07.2025.

Accepted: 11.07.2025.

ABOUT THE AUTHORS

Viktor E. Kislyakov –

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Open-pit Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

Artem S. Fedotov –

PhD student, Department of Open Pit Mining, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: ar.fedotow@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9552-2956>

Dmitry S. Snetkov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

Andrey V. Schwarzkopf – PhD student, Department of Open Pit Mining, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ

М. Г. Ефимов^{1✉}, А. Р. Мухутдинов²

¹ЧОУ ВО «Казанский инновационный университет имени В. Г. Тимирязова», Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

✉ jero07@bk.ru

Аннотация: Актуальной задачей нефтегазовой промышленности является повышение эффективности извлечения углеводородов из трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) с минимальным экологическим воздействием. Целью работы стало исследование влияния компонентного состава и начальных условий на эксплуатационные характеристики (СТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС): скорости горения и объема газообразных продуктов, а также разработка рекомендаций по их оптимизации для применения в скважинных газогенераторах. Для достижения цели использован нейросетевой программный модуль, апробированный на экспериментальных данных. Анализ показал, что давление и плотность заряда являются доминирующими факторами, управляющими процессом горения, тогда как компоненты АСС (горючее, катализаторы) обеспечивают «тонкую» настройку свойств топлива. Предложены составы СТТ АСС, адаптированные под типовые условия Западной Сибири (низкопроницаемые песчаники), Волго-Урала (карбонатные коллекторы) и Арктики (низкие пластовые температуры). Технология соответствует Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса РФ до 2035 года, обеспечивая импортозамещение и цифровизацию производственных процессов. Экологическая безопасность подтверждена снижением выбросов NO_x на 30–40 % и минимизацией загрязнения пластовых вод за счет полного сгорания (>99,8 %). Экономическая эффективность достигается через сокращение затрат на натурные испытания на 70 % и повышение коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7–12 %. Результаты соответствуют требованиям ISO 14001 и ФЗ № 166, что делает технологию востребованной в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: смешанное твердое топливо, аммиачно-селитренный состав, нейросетевое моделирование, скорость горения, экологическая безопасность, маркшейдерский мониторинг, Стратегия МСК РФ, экономическая эффективность

Для цитирования: Ефимов МГ, Мухутдинов АР. Нейросетевая оптимизация составов смешанных твердых топлив для повышения экономической эффективности термогидродинамического воздействия на нефтяные коллекторы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):53-58. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-53-58>.

NEURAL NETWORK OPTIMIZATION OF MIXED SOLID FUEL COMPOSITIONS TO IMPROVE THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THERMO-HYDRODYNAMIC IMPACT ON OIL RESERVOIRS

M. G. Efimov^{1✉}, A. R. Mukhutdinov²

¹Kazan Innovation University named after V. G. Timiryasov, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

✉ jero07@bk.ru

Abstract: An urgent task for the oil and gas industry is improving the efficiency of hydrocarbon recovery from difficult-to-recover reserves (DTR). The study aimed to investigate the influence of component composition and initial conditions on operational

characteristics (combustion rate, volume of gaseous products) of composite solid fuels (MSF) with an ammonium nitrate composition (ANC) and to develop recommendations for their optimization for use in downhole gas generators. A neural network software module validated on experimental data was employed. It was demonstrated that pressure and charge density are key factors governing the combustion process. Compositions of MSF ANC adapted to typical conditions in Western Siberia, the Volga-Ural region, and the Arctic were proposed. The results align with the Russian Federation's Mineral Resource Complex Development Strategy (MRC) until 2035 and ISO 14001 requirements.

Keywords: composite solid fuel, ammonium nitrate composition, neural network modeling, combustion rate, ecological safety, surveyor monitoring, MRC Strategy, economic efficiency

For citation: Efimov MG, Mukhutdinov AR. Neural network optimization of mixed solid fuel compositions to improve the economic efficiency of thermo-hydrodynamic impact on oil reservoirs. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):53-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-53-58>.

Введение

Интенсификация добычи нефти, особенно из трудно-извлекаемых запасов (ТРИЗ), требует применения современных методов воздействия на продуктивные пласты. Одним из перспективных направлений является термогидродинамическое воздействие с использованием скважинных газогенераторов на основе смесевых твердых топлив (СТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС) [1, 2]. Эффективность таких технологий напрямую зависит от контролируемости процесса горения СТТ и характеристик генерируемых продуктов: скорости горения и объема газов, которые определяют профиль давления и температурное поле в призабойной зоне пласта (ПЗП) [3, 4].

Оптимизация СТТ АСС направлена на решение задач импортозамещения в условиях санкционного давления, что соответствует стратегии развития определенной Межведомственным стратиграфическим комитетом (МСК) РФ до 2035 года.

Цель работы: исследование влияния компонентного состава и начальных условий на эксплуатационные характеристики смесевых твердых топлив (СТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС): скорость горения и объем газообразных продуктов, разработка рекомендаций по их оптимизации для применения в скважинных газогенераторах.

Объект исследования

Основным объектом исследования является процесс горения зарядов СТТ на основе АСС и их эксплуатационные параметры: скорость горения u и объем газообразных продуктов V . Эти параметры определяют эффективность термогидродинамического воздействия на нефтяные пласты, включая профиль давления и температурное поле в призабойной зоне (ПЗП). Исследование направлено на анализ влияния компонентного состава топлива и начальных условий (плотности заряда, пластового давления) на указанные параметры и разработку научно обоснованных рекомендаций по оптимизации рецептур СТТ АСС для применения в скважинных газогенераторах [5–8].

Методика исследования

Для достижения цели был использован нейросетевой программный модуль (НМ), разработанный авторами ранее [5], предназначенный для прогнозирования u и V . Модуль разработан на основе нейросетевой модели (НМ), созданной в среде *NeuroShell* (NS) – универсальный пакет для нейросетевого анализа данных [3]. Преимущества NS,

такие как высокая производительность, гибкость и низкие требования к вычислительным ресурсам, позволили создать эффективный инструмент для моделирования процессов горения.

Базовым элементом НМ является нейронная сеть, структура которой представлена на рисунке 1. Модель включает входной слой (данные о составе СТТ и условиях горения), скрытые слои (нелинейные преобразования) и выходной слой (прогноз значений u и V) [8].

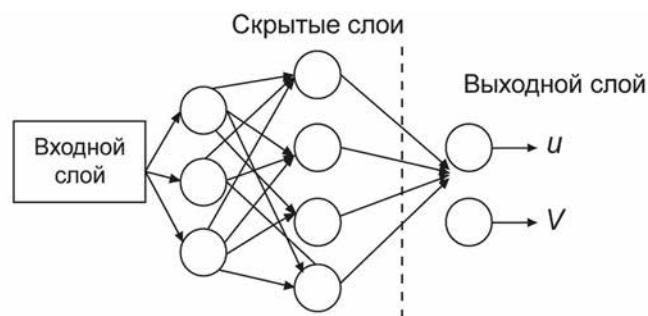


Рис. 1. Обобщенная структура нейронной сети, используемой в программном модуле аммиачно-селитренного состава / Fig. 1. Generalized structure of the neural network used in the ANC software module

Программная реализация выполнена на языке C, что обеспечило компактность кода и высокую точность расчетов (рис. 2).

Интерфейс модуля (рис. 3) позволяет пользователю задавать параметры топлива и получать прогнозируемые значения эксплуатационных характеристик.

Методика исследования включала следующие этапы:

1. *Спецификация задачи оптимизации для нефтегазового применения.*

Анализ типовых пластовых условий (давление $P_{пл}$, температура $T_{пл}$), при которых применяются СТТ АСС. Формулирование целевых диапазонов эксплуатационных параметров ($u_{цел}$, $V_{цел}$) в зависимости от задач воздействия на ПЗП [9].

2. *Параметрический анализ и прогнозирование.*

Варьирование состава СТТ АСС (содержание аммиачной селитры, горючего, катализаторов) в технологически допустимых пределах. Задание начальных параметров: плотности заряда ($\rho \cdot 10^3$, кг/м³) и среднего давления горения ($P_{ср} \cdot 10^6$, Па), эквивалентного пластовому давлению ($P_{пл}$). Прогноз значений u и V с помощью НМ.

```

void Fire_База знаний по испытаниям ACC(double *inarray,
double *outarray)
{
    double netsum;
    double feature2[61];

    /* inarray[0] - это x1 */
    /* inarray[1] - это x2 */
    /* inarray[2] - это x3 */
    /* inarray[3] - это x4 */
    /* inarray[4] - это x5 */
    /* inarray[5] - это x6 */
    /* outarray[0] - это y1 */
    /* outarray[1] - это y2 */

    inarray[0] = (inarray[0] - 72) / 16;

    inarray[1] = (inarray[1] - 5) / 21;

    inarray[2] = inarray[2] / 15;

    inarray[3] = inarray[3] / 6,54;

    inarray[4] = (inarray[4] - 1,03) / 0,4200001;

    inarray[5] = (inarray[5] - 1,13) / 115,37;

    inarray[0] *= 0,3411765;
    inarray[1] *= 0,2;
    inarray[2] *= 2,352941E-02;
    inarray[3] *= 1,176471E-02;
    inarray[4] *= 0,2588235;
    inarray[5] *= 2,811765;

```

Рис. 2. Фрагмент листинга программной реализации модуля аммиачно-селитренного состава на языке C [5] /

Fig. 2. Fragment of the listing of the software implementation of the ANC module in the C [5]

Рис. 3. Главное окно интерфейса программного модуля аммиачно-селитренного состава для прогнозирования параметров горения /

Fig. 3. The main interface window of the ANC software module for predicting combustion parameters

3. Анализ чувствительности и выявление ключевых факторов.

На основе данных НМ проведен анализ степени влияния входных параметров на u и V . Установлено, что давление $P_{пл}$ и плотность заряда ρ являются доминирующими факторами, определяющими процесс горения. Компоненты АСС (горючее, катализаторы) обеспечивают «тонкую» настройку свойств топлива под специфические геологические условия (рис. 4).

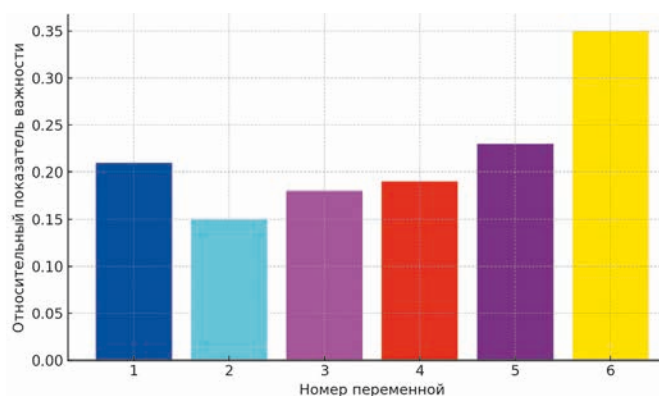


Рис. 4. Ранг относительных показателей важности: 1–4 – компоненты аммиачно-селитренного состава (горючее, катализатор 1 и катализатор 2 соответственно); 5 – плотность заряда; 6 – давление /

Fig. 4. Rank of relative importance indicators: 1–4 – ANC components (fuel, catalyst 1 and catalyst 2, respectively); 5 – charge density; 6 – pressure (Source: compiled by the authors)

4. Интерпретация зависимостей для задач оптимизации.

Зависимости $u = f(\rho)$ и $V = f(\rho)$ анализировались для выбора оптимальной плотности заряда, обеспечивающей заданные характеристики горения при различных $P_{пл}$.

5. Разработка рекомендаций и графических инструментов.

Формулирование практических рекомендаций по подбору рецептов СТТ АСС и технологических параметров (плотности). Предложение обобщенных графических представлений (номограмм, алгоритмов) для упрощения выбора оптимальных параметров.

Интеграция НМ в производственные системы МСК России (например, цифровую платформу «Роснефть-Цифра») позволит оперативно корректировать параметры топлива по данным геофизических исследований скважин (ГИС). Это соответствует целям Стратегии развития МСК РФ до 2035 года, включая импортозамещение и цифровизацию. Подобная интеграция НМ в системы управления добычей соответствует современным трендам цифровизации нефтегазовой отрасли и демонстрирует потенциал для оптимизации операций [10].

Экологическая безопасность технологии обеспечивается посредством снижения выбросов NO_x и CO за счет полного сгорания ($>99,8\%$) и использования катализаторов (K1/K2). Минимизации загрязнения пластовых вод солями аммония при $\rho > 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Исключения дегазации метана из вмещающих пород за счет импульсного воздействия вместо объемного прогрева. Экономическая эффективность достигается через сокращение затрат на натурные испытания (до 70 %) и повышение коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7–12 %.

Таким образом, применение НМ обеспечивает многовариантный анализ эксплуатационных параметров СТТ АСС, что критично для адаптации технологии к разнообразным геологическим условиям и требованиям устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса.

Результаты работы и их обсуждение

Применение СТТ АСС соответствует требованиям Федерального закона № 166-ФЗ «О государственной политике в сфере недропользования» (2021 г.), регламентирующего снижение техногенного воздействия на экосистемы. ISO 14001:2015 по управлению экологическим риском, включая минимизацию выбросов оксидов азота (NO_x) и углерода (CO)¹. ГОСТ 10227-86 «Топлива для реактивных двигателей», устанавливающего стандарты на топлива для реактивных двигателей и контролирующего качество компонентов СТТ.

Технология термогидродинамического воздействия с использованием СТТ АСС демонстрирует следующие экологические преимущества:

- снижение выбросов NO_x на 30–40 % за счет оптимизации состава катализаторов (K1/K2), ограничивающих пиковые температуры до 900–1000 °C [11];
- минимизацию загрязнения пластовых вод за счет полного сгорания (>99,8 %) при плотности заряда $\rho > 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- исключение дегазации метана из вмещающих пород благодаря импульсному воздействию вместо объемного прогрева.

Внедрение СТТ АСС с нейросетевой оптимизацией снижает затраты на освоение ТриЗ на 15–30 % по сравнению с традиционными методами.

На месторождениях Западной Сибири (например, Баженовская свита) экономия достигается за счет:

- снижения расходов на гидроразрыв пласта (ГРП) на 20 % при замене его на термогидродинамическое воздействие [12];
- увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7–12 % за счет контролируемого трещинообразования;
- сокращения капитальных затрат на 30 % за счет уменьшения объема натурных испытаний (нейросетевое моделирование заменяет до 70 % экспериментов).

Для Волго-Уральского региона (карбонатные коллекторы) адаптация СТТ АСС под высокую трещиноватость снижает риски обрушения пород, экономия до 15 % затрат на ремонт скважин.

После термогидродинамического воздействия проводится маркшейдерский контроль устойчивости призабойной зоны, а также используются лазерное сканирование ствола скважины для выявления микротрещин и сейсмоакустический мониторинг для оценки изменения напряженного состояния пород. Эти методы соответствуют рекомендациям ФГБУ «ЦНИГРИ» и обеспечивают безопасную эксплуатацию скважин в сложных геологических условиях (например, трещиноватые коллекторы Волго-Урала).

Разработка СТТ АСС поддерживает ключевые цели Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации:

- импортозамещение в нефтесервисных технологиях за счет отказа от зарубежных решений;

¹ГОСТ 10227-86. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1986. 12 с.

– повышение эффективности освоения ТриЗ, особенно для Баженовской свиты и других сложных геологических условий;

– цифровизацию производственных процессов через интеграцию программного модуля АСС в платформы типа «Роснефть-Цифра».

Эти аспекты делают технологию востребованной в рамках проекта освоения нераспределенного фонда недр (ПНОФ).

На основе данных, полученных с помощью нейросетевого модуля [5], выявлены доминирующие факторы (рис. 4), влияющие на скорость горения u и объем газообразных продуктов V : давление P и плотность заряда ρ – ключевые параметры, управляющие процессом горения.

Компонентный состав АСС (горючее, катализаторы) обеспечивает «тонкую» настройку свойств топлива под специфические условия. Например, для состава АСС (83 % АС, 10 % Г, 7 % К1) при давлении 81,05 МПа увеличение плотности в диапазоне $1,1–1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ приводит к снижению скорости горения на 21,7 % (рис. 5) и незначительному уменьшению объема газов – на 0,7 % (рис. 6).

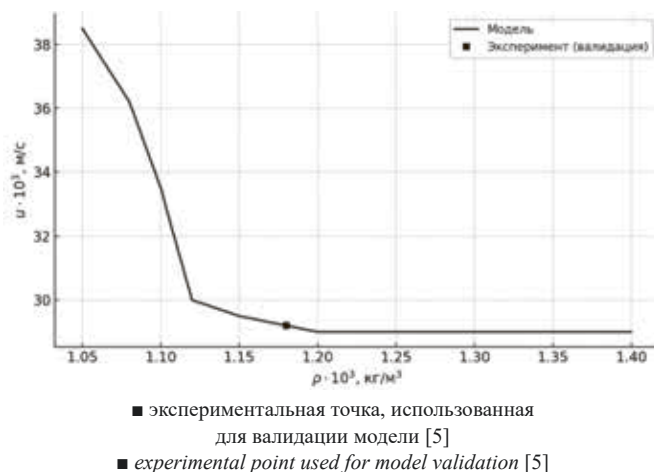


Рис. 5. Зависимость u от ρ смесевых твердых топлив аммиачно-селитренного состава (состав: 83 % АС, 10 % Г, 7 % К1; $P_{\text{ср}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Па}$), полученная на основе нейросетевой модели /
Fig. 5. Dependence of u on ρ of MSF ANC (composition: 83 % AN, 10 % F, 7 % C1; $P_{\text{av}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$), obtained on the basis of the neural network model

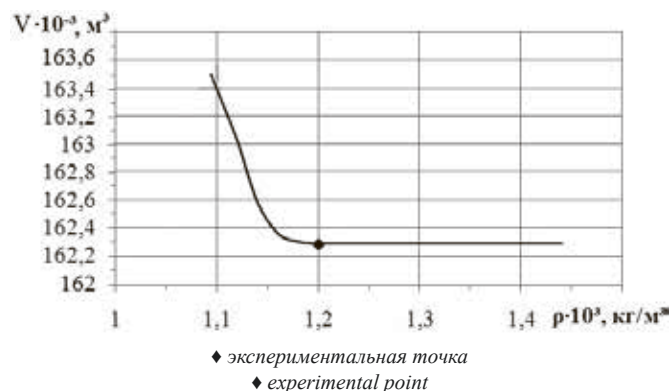


Рис. 6. Зависимость объема газообразных продуктов горения V от плотности заряда ρ смесевых твердых топлив аммиачно-селитренного состава (состав: 83 % АС, 10 % Г, 7 % К1; $P_{\text{ср}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Па}$), полученная на основе нейросетевой модели [7] /
Fig. 6. Dependence of the volume of gaseous combustion products (V) on the charge density (ρ) of the MSF ANC (composition: 83 % AN, 10 % F, 7 % C1; $P_{\text{av}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$), obtained on the basis of a neural network model [7]

Это позволяет контролировать нарастание давления в призабойной зоне при работе с механически слабыми коллекторами (плотность $1,15\text{--}1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), инициировать трещинообразование в низкопроницаемых песчаниках (плотность $1,10\text{--}1,12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) [13], Пат. RU 2297524 С2². Способ разработки залежи высоковязкой нефти. № 2005117051/03.

Заключение

1. Практические рекомендации по оптимизации:

– для высокопроницаемых, но трещиноватых коллекторов (например, карбонатные резервуары с давлением 25–50 МПа): использовать смесевые твердые топлива аммиачно-селитренного состава с повышенной плотностью ($1,15\text{--}1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) для снижения риска неконтролируемого роста трещин. Уровень газогенерации остается высоким, что обеспечивает эффективное вытеснение нефти;

– для низкопроницаемых монолитных коллекторов (плотные песчаники при давлении 10–30 МПа): применять смесевые твердые топлива аммиачно-селитренного состава с пониженной плотностью ($1,10\text{--}1,12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) для генерации резких импульсов давления. Дополнительно оптимизировать соотношение аммиачной селитры и горючего для максимизации газогенерации;

– для истощенных пластов с низким остаточным давлением: адаптировать составы смесевых твердых топлив для мак-

симального объема газов при умеренной скорости горения. Контролировать полноту сгорания и температуру продуктов для снижения вязкости нефти.

2. Внедрение смесевых твердых топлив аммиачно-селитренного состава предполагает: интеграцию нейросетевого модуля в АСУ ТП «умных месторождений» (например, «Роснефть-Цифра») для онлайн-коррекции параметров топлива по данным ГИС; использование мобильных установок зарядки скважинных газогенераторов на лицензионных участках, в том числе в труднодоступных регионах (Ямал, Восточная Сибирь); маркшейдерский мониторинг деформаций ствола скважин после термогидродинамического воздействия с применением лазерного сканирования и сейсмоакустики.

Выводы

1. Нейросетевое моделирование подтвердило, что давление и плотность заряда являются ключевыми факторами, управляющими скоростью горения и объемом газогенерации СТТ АСС.

2. Экологическая безопасность технологии обеспечена за счет снижения выбросов NO_x на 30–40 % и минимизации загрязнения пластовых вод. Экономическая эффективность достигается через сокращение затрат на ГРП (15–20 %) и повышение КИН (7–12 %).

3. Интеграция в цифровые платформы и маркшейдерский мониторинг соответствует Стратегии развития МСК РФ до 2035 года. Результаты соответствуют требованиям ISO 14001 и ФЗ № 166-ФЗ, что делает технологию востребованной в долгосрочной перспективе.

²Пат. RU 2297524 С2. Способ разработки залежи высоковязкой нефти / Закиров С.Н., Булаев В.В., Закиров Э.С. № 2005117051/03; заявл. 03.06.2005; опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11. 13 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Жилина ИВ. Перспективы разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов с позиции концепции устойчивого развития сырьевой базы нефтегазового комплекса России. *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2018; 4 (23): 27. [Zhilina IV. Prospects for the Development of Hard-to-Recover Hydrocarbon Reserves from the Position of the Concept of Sustainable Development of the Raw Material Base of the Oil and Gas Complex of Russia. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018; 4 (23): 27. (In Russ.)].
- Wang L, et al. Thermohydrodynamic Stimulation Using Downhole Gas Generators Based on Composite Solid Fuels: Experimental and Numerical Analysis. *Fuel*. 2017; 205: 145-158.
- Решетников СМ, Фролов ВМ. Современные подходы к моделированию процесса горения смесового твердого топлива. *Бутлеровские сообщения*. 2012; 30 (6): 1-25. [Reshetnikov SM, Frolov VM. Modern Approaches to Modeling the Combustion Process of Composite Solid Fuel. *Butlerov Communications*. 2012; 30 (6): 1-25. (In Russ.)].
- Тиссо Б, Вельте Д. Образование и распространение нефти. Москва, 1981: 501. [Tissot B., Welte D. Formation and Distribution of Oil. Moscow, 1981: 501. (In Russ.)].
- Мухутдинов АР, Ефимов МГ, Сафиуллин РИ. Изучение зависимости скорости горения аммиачно-селитренного топлива от эксплуатационных характеристик его заряда с использованием нейросетевых технологий. *Вестник технологического университета*. 2017; 20 (18): 127-129. [Mukhutdinov AR, Efimov MG, Safiullin RI. Study of the dependence of the combustion rate of ammonium nitrate fuel on the operational characteristics of its charge using neural network technologies. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20 (18): 127-129. (In Russ.)].
- Мухутдинов АР, Ефимов МГ. Компьютерное моделирование теплообмена хлорбензола в электрическом поле. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014; 17 (24): 138-140. [Mukhutdinov AR, Efimov MG. Computer modeling of chlorobenzene heat transfer in an electric field. *Bulletin of the Kazan. technological University*. 2014; 17 (24): 138-140. (In Russ.)].
- Мухутдинов АР, Ефимов МГ, Сафиуллин РИ и др. Программный модуль на основе нейронной сети для прогнозирования скорости горения смесового твердого топлива. *Вестник технологического университета*. 2017; 20 (24): 102-104. [Mukhutdinov AR, Efimov MG, Safiullin RI, et al. Software module based on neural network for predicting the combustion rate of mixed solid fuel. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20 (24): 102-104. (In Russ.)].
- Kim Seongmin, Xu Jiaxin, Shang Wenjie, et al. A review on machine learning-guided design of energy materials. *Progress in Energy*. 2024; 6 (4): 042005. DOI: 10.1088/2516-1083/ad7220.
- Alkinani Husam H., et al. Applications of Artificial Neural Networks in the Petroleum Industry: A Review. *Society of Petroleum Engineers*. 2019. DOI: 10.2118/195072-MS.
- Shen Fei, Ren Shuang, Zhang Xiang, et al. A Digital Twin-Based Approach for Optimization and Prediction of Oil and Gas Production. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021: 1-8. DOI: 10.1155/2021/3062841.
- Gao Fengyu, Tang Xiaolong, Yi Honghong, et al. A Review on Selective Catalytic Reduction of NO_x by NH_3 over Mn-Based Catalysts at Low Temperatures: Catalysts, Mechanisms, Kinetics and DFT Calculations. *Catalysts*. 2017; 7: 199. DOI: 10.3390/catal7070199.
- Sun Qian, Zhang na, Liu Wei, et al. Insights into enhanced oil recovery by thermochemical fluid flooding for ultra-heavy reservoirs: An experimental study. *Fuel*. 2023; 331: 125651. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125651.
- Davis ME, Davis RJ. Fundamentals of Chemical Reaction Engineering. *McGraw-Hill*. 2003: 784.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Геннадьевич Ефимов –

старший преподаватель кафедры компьютерного моделирования и техносферной безопасности ЧОУ ВО «Казанский инновационный университет имени В. Г. Тимирязова», 420111, Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация, e-mail: jero07@bk.ru

Аглям Рашидович Мухутдинов –

д-р техн. наук, профессор кафедры технология твердых химических веществ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация, e-mail: muhutdinov@rambler.ru

ABOUT THE AUTHORS

Maksim G. Efimov –

Senior Lecturer, Department of Computer Modeling and Technosphere Safety, Private Educational Institution of Higher Education “Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov”, 420111, Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation, e-mail: jero07@bk.ru

Aglyam R. Mukhutdinov –

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technology of Solid Chemicals, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technological University”, 420015, Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation, e-mail: muhutdinov@rambler.ru

Критерии авторства / Contribution:

А. Р. Мухутдинов – научное руководство, концепция исследования; М. Г. Ефимов – написание исходного текста, проведение анализа данных, разработка итоговых выводов / A. R. Mukhutdinov – scientific guidance, research concept; M. G. Efimov – writing the source text, data analysis, development of final conclusions.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.06.2025.

Поступила после рецензирования: 18.07.2025.

Принята к публикации: 08.08.2025.

Article info

Received: 11.06.2025.

Revised: 18.07.2025.

Accepted: 08.08.2025.

К КОНЦЕПЦИИ ДРОБЛЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В МЕЛЬНИЦАХ

Ю. В. Дмитрак^{1✉}, В. И. Голик²

¹ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

²Геофизический институт Владикавказского научного центра, г. Владикавказ, Российская Федерация

✉ dmitrak@yandex.ru

Аннотация: Приведены результаты многофакторного анализа основных операций процесса измельчения минерального сырья в шаровых, вибрационных и планетарных мельницах, актуальность которых возрастает по мере изменения демографических, экономических и прочих условий в странах мира. Параметры измельчения исследовались в лабораторных и промышленных мельницах, функционирующих на горно-обогатительных фабриках и в других цехах подготовки минерального сырья, путем сопоставления проб исходного сырья и разгрузки мельницы с использованием контрольных сит. Тонина помола исследовалась в барабанной мельнице. Прочие параметры исследовались с использованием общепризнанных методов. Установлено, что наличие многочисленных факторов и эмпирический характер используемых величин не позволяют применять имеющуюся исследовательскую базу для решения задач механического дробления и измельчения. Рекомендовано в качестве критериев динамического разрушения хрупких сред при производстве технологических процессов использовать критерий критического напряжения при ударе, скорость упругих волн и значение динамической вязкости. Показано, что между коэффициентом разрушения и размерами поверхностей раскола при хрупком разрушении горных пород в результате удара существует устойчивая корреляция. Выявлено, что новая концепция рудоподготовки должна основываться на фазово-структурных свойствах сырья, возможности процессов раскрытия и параметрах оборудования. Такая концепция в большей мере будет отвечать принципам гуманизации отношений в системе «Природа – человек». Результаты выполненных многофакторных исследований могут быть востребованы при разработке действующих модернизируемых и строящихся месторождений твердых полезных ископаемых в горнодобывающих отраслях, а также при подготовке кадров высшей квалификации в высших учебных заведениях.

Ключевые слова: минеральное сырье, измельчение, мельница, концепция, технология, динамическое разрушение, анализ

Для цитирования: Дмитрак ЮВ, Голик ВИ. К концепции дробления и измельчения минерального сырья в мельницах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):59-64. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-59-64>.

TOWARDS THE CONCEPT OF CRUSHING AND GRINDING OF MINERAL RAW MATERIALS IN MILLS

Yu. V. Dmitrak^{1✉}, V. I. Golik²

¹Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

✉ dmitrak@yandex.ru

Abstract: The article presents the results of a multifactorial analysis of the main operations of the technological process of grinding mineral raw materials in ball, vibration and planetary mills, the relevance of which will increase as demographic, economic and other conditions change in the countries of the world. The grinding parameters are studied in laboratory and industrial mills operating in mining and processing plants and other workshops for the preparation of mineral raw materials by comparing samples of raw materials and unloading the mill using control sieves. The fineness of the grinding is carried out in a drum mill. Other parameters are investigated using generally accepted methods. It is established that the presence of numerous factors and the empirical nature of the quantities used do not allow the use of the available research base for solving problems of mechanical crushing and grinding. It is recommended to

use the criterion of critical stress at impact, the velocity of elastic waves and the value of dynamic viscosity as criteria for the dynamic destruction of brittle media in the production of technological processes. It is shown that there is a stable correlation between the fracture coefficient and the size of the split surfaces during brittle fracture of rocks as a result of impact. It was revealed that the new concept of ore preparation should be based on the phase-structural properties of raw materials, the possibility of disclosure processes, and equipment parameters. Such a concept will be more consistent with the principles of humanization of relations in the «Nature – Man» system. The results of the completed multifactorial studies can be in demand in the development of existing modernized and under construction deposits of solid minerals in the mining industries, as well as in the training of highly qualified personnel in higher educational institutions.

Keywords: mineral raw materials, grinding, mill, concept, technology, dynamic destruction, analysis

For citation: Dmitrak YuV, Golik VI. Towards the concept of crushing and grinding of mineral raw materials in mills. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-59-64>.

Введение

Актуальность проблемы разрушения различных материалов при динамическом нагружении связана с практическим применением интенсивных нагрузок в процессах дробления и измельчения горных пород. Исследования механизма измельчения минеральных сред и полезных ископаемых основываются на изучении распада исходной частицы под действием разрушающей силы, исходя из того, что свойства исследуемого процесса не зависят от взаимодействия между участвующими в процессе частицами [1].

Целью многочисленных исследований является построение алгоритма разрушения частицы свободным ударом в измельчающем устройстве. Этот алгоритм состоит из моделирования механического воздействия и разрушения частицы и моделирования гранулометрического состава продукта разрушения. Крупность дробления и измельчения оценивается с точки зрения обеспечения технологического вскрытия руд [2–4].

К основным вопросам проблемы относятся определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов и определение коэффициента демпфирования ударного импульса при измельчении пород [5–6].

Параметры ресурсосберегающих технологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых определяются в результате комплексного анализа условий устойчивого развития природно-технической системы, важное место среди которых занимают вопросы дробления и измельчения сырья [7–10].

Возможность создания условий для инфильтрации растворов выщелачивания является основным критерием применения геотехнологии при добыче технологически вскрываемых руд [11–14].

Экологические и горнотехнические аспекты безопасности разработки месторождений определяются с применением методов моделирования и геоинформационных технологий [15–17].

Вопросы совершенствования технологии добычи и переработки руд (современные вызовы, устойчивое развитие и переход к новой технологической парадигме) рассмотрены в работах [18–20].

Цель статьи: анализ основных операций технологического процесса измельчения минерального сырья в шаровых, вибрационных и планетарных мельницах.

Методика исследований

При обосновании производительности мельницы исследовались пробы исходной породы и разгрузки мельницы, в

которых определялся гранулометрический состав остатка на контрольном сите.

Для анализа влияния времени измельчения на гранулометрический состав образуемых зерен исследовались пробы одинаковой крупности с одинаковой скоростью для сравниваемых руд.

Тонина помола исследовалась в барабанной мельнице. Параметры изменялись в равном диапазоне: крупность мелющих шаров – 15...50 мм; степень заполнения барабана мелющими телами – 0,26...0,9; частота вращения барабана – 0,6...0,9 от критической.

Результаты исследований

Модели ударного разрушения горных пород

Вероятность разрушения пород подчиняется нормальному закону:

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

где t – время,

$$t = 1.09 \ln \left(v / v_{кр} \right),$$

здесь $v_{кр}$ – критическая скорость разрушения частицы.

В условиях ударного нагружения частиц:

$$v_{кр} = \frac{1.9 (\tau_{ср} / \rho \cdot 10^{-4} + 1)}{x_{исх}^{0.4}},$$

где $\tau_{ср}$ – предел прочности материала на срез, МПа;

ρ – плотность, г/см³;

$x_{исх}$ – размер частицы, мм.

Минерал разрушается при условии

$$0 \leq \rho^x \leq \rho,$$

где ρ^x – случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Математическое ожидание числа крупных осколков от разрушения исходной частицы:

$$M = \operatorname{int} \left[B (v / v_{кр})^l \right] + 2,$$

где B – вероятное число крупных частиц-осколков, уменьшенное на 2, от разрушения исходной частицы материала при скорости воздействия $v_{кр}$;

1 – коэффициент.

Трудности учета многочисленных факторов и несовпадения с практикой применения, а также эмпирический характер используемых величин не позволяют применить имеющуюся базу для построения универсальной теории разрушения (раскрытия) зерен.

Процесс разрушения твердых тел происходит за счет волн напряжений, поэтому многие методики не предусматривают определение гранулометрического состава.

Энергия разрушения расходуется на образование новой поверхности, поэтому распределение масс осколков определяют исходя из максимальной энтропии при сохранении одной и той же суммарной массы осколков.

В качестве критериев динамического разрушения хрупких сред в работе рекомендуется использовать критерий критического напряжения в материале при ударе, скорости продольной и поперечной упругих волн и значения динамической вязкости материала.

Влияние свойств породы на их дробимость

Разрушение включает в себя деформацию структурных элементов различного состава: микродефекты, макротрещины и т.п.

Динамическое нагружение горных пород изменяет их напряженно-деформированное состояние. Высокая интенсивность возникающих напряжений в горной породе приводит к новым явлениям по сравнению со статической нагрузкой.

При нагрузке образца породы ее деформация не достигает конечного значения, а растет со временем и уменьшается при снятии нагрузки. С ростом скорости деформации прочностные показатели увеличиваются, особенно при переходе от квазистатических нагрузок к динамическим.

Для каждого типа горной породы существует напряжение, которое соответствует раскрытию и росту микротрещин, не зависящее от скорости деформации и превышающее на 10–40 % стандартную прочность на сжатие.

Показатель прочности образца горной породы или минеральной среды на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ зависит от размера разрушаемого образца. При достижении предельно допустимого значения напряжения растяжения в устье трещины $\sigma_{р.т}$ начинается процесс роста трещины. Из-за возникновения в контакте зоны всестороннего сжатия конической формы происходит раскол образца.

Между коэффициентом интеркристаллитного разрушения и фрактальными свойствами поверхностей раскола при хрупком разрушении горных пород существует корреляция.

Закон деформирования материала имеет вид:

$$s = eE \text{ при } \sigma \leq \sigma_0$$

или

$$s = s_0 + K (e - s_0 E) \text{ при } \sigma > \sigma_0$$

где K – модуль упрочнения;

σ_0 – предел упругости материала.

Кинетика и энергозатратность измельчения

С целью изучения кинетики тонкого измельчения руд и выбора параметров барабанных мельниц определялись кинетические константы измельчения тонких узких классов крупности при разных режимах и условиях работы лабораторной мельницы.

Энергонасыщенность процесса измельчения определяет характер связи между массой крупного остатка в рабочем пространстве измельчителя и скоростью убывания этой массы показателя степени n в уравнении:

$$dR/dt = -kR^n,$$

где R – масса крупного остатка.

Коэффициент скорости измельчения k зависит от количества расходуемой энергии при постоянном значении n :

$$k = k_0 e^{-E_0/E},$$

где k_0 – коэффициент, определяемый экспериментально;

E_0 – энергия, которую необходимо подвести к единице объема материала в единицу времени, чтобы соблюдалось условие $k_0 = k$;

E – энергия, подводимая к измельчаемому материалу.

Одним из направлений совершенствования дробильно-измельчающих машин является снижение энергоемкости процесса измельчения.

Работа разрушения описывается законом П. А. Ребиндера:

$$A = A_v + A_s,$$

где A_v – работа деформации;

A_s – работа на образование новой поверхности.

В барабанных мельницах кинетическая энергия разрушаемых материалов передается через их поверхность и превращается в работу образования новой поверхности и теплоту. Распределение затрат энергии пропорционально прочности и массовой доле данного материала.

Прочностные параметры пород приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Прочностные параметры руд и пород / Strength parameters of ores and rocks

Минерал	Плотность, кг/м ³ ·10 ³	Модуль упругости, Па·10 ¹⁰	Предел прочности, Па·10 ⁵		Работа разрушения, Дж/м ³ ·10 ⁵	Мощность, кВт·ч/т·10 ⁻²
			$\sigma_{сж}$	σ_p		
Мартит	3,58	5,3	2 370	174	14,1	10,95
Пирротин	4,58	4,5	2 610	272	20,1	12,2
Гематит	5,1	21,2	600	60	0,226	0,123
Кварц	2,78	8,3	4 000	210	25,64	26,64
Магнетит	4,7	10,5	520	140	0,342	0,2
Корунд	4,03	43,86	5 000	200	7,581	5,23
Пирит	5,0	14,0	1 280	160	1,56	0,87
Магнетит	3,87	7,0	1 440	102	3,94	2,83

Затраты энергии при дроблении составляют 10...20 % общего расхода, а для измельчения руд они составили 56...82 % от общих затрат энергии.

Результаты вычислений энергозатрат при грубом измельчении приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Затраты энергии при грубом измельчении /
Energy consumption during coarse grinding**

Минерал	Конечная крупность, мм					
	1,0	0,7	0,5	0,2	0,1	0,075
	Расход энергии, кВт·ч/т					
	1,0	0,7	0,5	0,2	0,1	0,075
Кальцит	1,14	1,35	1,64	2,37	8,46	13,29
Апатит	2,71	3,90	5,10	7,43	18,61	23,98
Кварц	6,07	6,71	7,41	8,67	14,08	17,10

Перспективы применения мельниц

Процессы дробления и измельчения материалов являются определяющими во многих технологических процессах. В их основе заложены удар, раздавливание и истирание. Выбор способа разрушения зависит от физико-механических свойств измельчаемого материала, начальной величины разрушаемых кусков, требуемой крупности и ряда других факторов.

Совершенствование дробильно-измельчающих машин развивается в направлении снижения энергоемкости процесса измельчения, что достигается использованием таких механизмов разрушения, при которых в измельчаемом материале формируется сложное напряженное состояние с упругими деформациями.

Достаточно широкое применение для измельчения получили шаровые мельницы, в которых реализуется сухое и мокрое измельчение. Преимуществами шаровых мельниц являются легкость регулировки и эксплуатации, возможность изменения режима измельчения, получение тонкого продукта при различной крупности питания. К недостаткам шаровых мельниц можно отнести высокую энергоемкость и высокий износ футеровок и мелющих шаров.

Конструктивная особенность планетарной мельницы состоит в том, что она имеет три или четыре барабана, которые вращаются вокруг центральной и собственных осей одновременно. Характер движения мелющей среды для планетарных мельниц с коротким водилом отличается от шаровых мельниц. При уменьшении длины водила планетарная мельница превращается в вибрационную мельницу. Для определения зависимости границ основных режимов загрузки в планетарно-центробежной мельнице с вертикальными осями от коэффициента загрузки используют математическую модель водопадного режима загрузки.

Более трех десятилетий работают вибромельницы, где высокая степень измельчения достигается за счет удара с истиранием, а вибрация позволяет вести процесс измельчения без сцепления частиц. Для высокопроизводительных вибромельниц перспективны режимы с большой амплитудой колебаний помольного барабана, которые описываются

моделью динамической обработки мелющей среды. На начальном этапе измельчения наиболее эффективной является максимальная скорость нагружения. Высокие скорости нагружения становятся неэффективными по затратам энергии на процесс. Если измельчение переходит в область частиц микронных размеров, предпочтительнее оказываются планетарно-центробежные мельницы с переменной структурой и управлением. Конструкция вибромашины должна допускать возможность изменения частоты и амплитуды вибрирующего органа в рабочем режиме.

Математическая модель вибромельницы базируется на дифференциальном уравнении вынужденных колебаний массы трубы с шарами, опирающейся на пружину и поршневой демпфер. Число оборотов мельницы является решающим фактором для определения производительности, расхода энергии и других технико-экономических показателей.

Заключение

1. Теоретически обоснованы новые технологические режимы измельчения, которые соответствуют повышенным угловым скоростям вращения барабана мельницы и пониженным значениям заполнения мельницы. Анализ показал, что удельный расход электроэнергии на тонину измельченного материала можно снизить в 1,5...2,0 раза за счет передачи энергии от внутренней поверхности барабана мельницы малоподвижному ядру через более тонкий слой сырья.

2. Мелющее тело в процессе движения испытывает последовательность соударений с футеровкой или мелющими телами; в промежутках между соударениями мелющие тела движутся под действием силы тяжести по параболическим траекториям; соударения представляются как мгновенные изменения скоростей. За критерий периодичности принята повторяемость контролируемых переменных.

3. Новое аналитическое направление рудоподготовки характеризуется как создание технологических схем, базирующихся на фазово-структурных свойствах сырья, параметров процессов раскрытия, концентрации и оборудования.

4. Модели массопереноса отличаются критерием результатов переработки сырья по грансоставу и доле вскрытых минералов. Математический метод описания схем обогащения позволяет разработать программу компьютерного выбора технологических схем. Метод получил название – фазово-структурный метод синтеза технологических схем.

Выводы

1. Многочисленность и эмпирический характер учитываемых факторов затрудняет решение задач дробления и измельчения минерального сырья.

2. В качестве критериев разрушения минералов целесообразно использовать критическое напряжение удара, скорость упругих волн и динамическую вязкость.

3. Параметры разрушения и размеры поверхностей раскола при хрупком разрушении горных пород в результате удара коррелятивно связаны.

4. Концепция рудоподготовки должна основываться на свойствах и возможности раскрытия минералов и возможностях оборудования.

5. Результаты исследования могут быть использованы при разработке месторождений твердых полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Земсков ЕП, Зайцев АИ, Васильев ВА и др. Теоретическое исследование процесса высокодисперсного ударного разрушения одиночной частицы. *Интенсивная механическая технология сыпучих материалов*. Иваново, 1990: 38-42. [Zemskov EP, Zaitsev AI, Vasiliev VA, et al. Theoretical investigation of the process of highly dispersed shock destruction of a single particle. *Intensive mechanical technology of bulk materials*. Ivanovo, 1990: 38-42. (In Russ.)].
2. Голик ВИ, Клюев РВ, Мартюшев НВ и др. Технология безотходной утилизации хвостов Мизурского горно-обогатительного комбината. *Металлург*. 2023; 66 (11-12): 1476-1480. [Golik VI, Klyuyev RV, Martyshev NV, et al. Technology of waste-free disposal of tailings of the Mizur mining and processing combine. *Metallurgist*. 2023; 66 (11-12): 1476-1480. (In Russ.)]. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
3. Бригада ВС, Голик ВИ, Клюев РВ и др. Повышение эффективности использования активированных хвостохранилищ при подземной добыче полезных ископаемых. *Металлург*. 2023; 67 (3-4). [Brigida VS, Golik VI, Klyuev RV, et al. Improving the efficiency of using activated tailings storage facilities in underground mining. *Metallurgist*. 2023; 67 (3-4) (In Russ.)]. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
4. Голик ВИ, Клюев РВ, Мартюшев НВ и др. Повторное использование и механохимическая переработка хвостов обогащения, используемых для извлечения Pb и Zn. *Материалы*. 2023; 16: 7004. [Golik VI, Klyuev RV, Martyshev NV, et al. Reuse and mechanochemical processing of enrichment tailings used to extract Pb and Zn. *Materials*. 2023; 16: 7004. (In Russ.)]. DOI: 10.3390/MA16217004.
5. Дмитрак ЮВ, Атрушкевич ВА, Кубрин СС и др. Определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022; 14, 3 (53): 468-478. [Dmitrak YuV, Atrushkevich VA, Kubrin SS, et al. Determination of the energy of shock pulses in the process of crushing rocks for mills of various types. *Sustainable development of mountain territories*. 2022. 14, 3 (53): 468-478. (In Russ.)].
6. Дмитрак ЮВ, Атрушкевич ВА, Адамова ЛС. Определение коэффициента демпфирования ударного импульса при измельчении горных пород. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022; 14, 4 (54): 702-710. [Dmitrak YuV, Atrushkevich VA, Adamova LS. Determination of the shock pulse damping coefficient during rock crushing. *Sustainable development of mountain territories*. 2022. 14, 4 (54): 702-710. (In Russ.)].
7. Рыбак Я, Хайрутдинов ММ, Конгар-Сюрюн ЧБ и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13, 3 (49): 405-415. [Rybak Ya, Khairutdinov MM, Kongar-Suryun ChB, et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountain territories*. 2021; 13, 3 (49): 405-415. (In Russ.)].
8. Hoek E, Brown ET. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019; 11 (3): 445-463.
9. Масленников СА. Оценка влияния температуры на скорость набора прочности бетоном. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010; 9: 309-312. [Maslennikov SA. Assessment of the influence of temperature on the rate of concrete strength gain. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and Technical journal)*. 2010; 9: 309-312. (In Russ.)].
10. Рыбак Ю, Горбатюк С, Буяновна-Сюрюн К и др. Утилизация минеральных отходов: способ расширения минерально-сырьевой базы горно-металлургического предприятия. *Металлург*. 2021; 64: 851-861. [Rybak Yu, Gorbatyuk S, Buyanovna-Syuryun K, et al. Utilization of mineral waste: a way to expand the mineral resource base of a mining and metallurgical enterprise. *Metallurgist*. 2021; 64: 851-861. (In Russ.)].
11. Bloodworth A, Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
12. Соколов ИВ, Антипин ЮГ, Никитин ИВ. Методология выбора подземной геотехнологии при гибридной добыче руды. Екатеринбург, 2021: 340. [Sokolov IV, Antipin YuG, Nikitin IV. Methodology of choosing underground geotechnology for hybrid ore mining. Yekaterinburg, 2021: 340. (In Russ.)].
13. Chen G, Chen J, Peng J. Effect of mechanical activation on structural and micro-wave absorbing characteristics of high titanium slag. *Powder Technology*. 2015; 286: 218-222. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.08.021.
14. Palaniandy S. Impact of mechanochemical effect on chalcopyrite leaching. *International Journal of Mineral Processing*. 2015; 136: 56-65.
15. Löföw J, Abrahamsson L, Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019; 36 (4): 701-707.
16. Ляшенко ВИ, Воробьев АЕ, Хоменко ОЕ и др. Экологическая и горнотехническая безопасность разработки месторождений в энергонарушенных горных массивах: проблемы и перспективы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021; 3 (113): 43-55. [Lyashenko VI, Vorobyov AE, Khomenko OE, et al. Environmental and mining safety of field development in energy-damaged mountain ranges: problems and prospects. *Surveying and Subsoil use*. 2021; 3 (113): 43-55. (In Russ.)].
17. Трофимов АВ, Киркин АП, Румянцев АЕ и др. 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, Rumyantsev AE, et al. 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: 22-27. (In Russ.)]. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03.
18. Яицкая НА, Бригада 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. *Geography and geophysics of the South of Russia*. 2022. 12 (1): 162-173. (In Russ.)]. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.
19. Гембицкая ИМ, Гвоздецкая МВ. Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков. *Записки Горного института*. 2021; 249: 401-407. [Gembitskaya IM, Gvozdetskaya MV. Transformation of grains of technological raw materials in the production of fine powders. *Notes of the Mining Institute*. 2021; 249: 401-407. (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.
20. Каплунов ДР, Айнбиндер ИИ, Федотенко ВС и др. Технологии подземной добычи руды: современные вызовы, устойчивое развитие и переход к новой технологической парадигме. *Горный журнал*. 2021; 9: 4-11. [Kaplunov DR, Einbinder II, Fedotenko VS, et al. Technologies of underground ore mining: modern challenges, sustainable development and transition to a new technological paradigm. *Mining Journal*. 2021; 9: 4-11. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрак Юрий Витальевич –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник,
начальник отдела моделирования и управления
горнотехническими системами. Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем комплексного освоения недр им. академика
Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: dmitrak@yandex.ru

Владимир Иванович Голик –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник.
Геофизический институт Владикавказского научного
центра, г. Владикавказ, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Yuri V. Dmitrak –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the
Department of Modeling and Management of Mining Systems,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian
Federation, e-mail: dmitrak@yandex.ru

Vladimir I. Golik –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center, Vladikavkaz,
Russian Federation

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.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.08.2025.

Поступила после рецензирования: 14.08.2025.

Принята к публикации: 02.09.2025.

Article info

Received: 01.08.2025.

Revised: 14.08.2025.

Accepted: 02.09.2025.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ УГЛУБКЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

П. В. Волков, И. А. Пыталев[✉], К. И. Струков, Р. В. Кульсаитов, Р. И. Бикбов
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
[✉] vehicle@list.ru

Аннотация: В ходе исследования проведен анализ технологических решений безопасности при углубке вертикальных шахтных стволов. Разработаны методологические подходы к оценке рисков и проектированию защитных конструкций с учетом специфики подземного пространства. Предложено инновационное предохранительное устройство, обеспечивающее эффективную и безопасную замену предохранительному целику. Внедрение технологических решений и конструкций предохранительных устройств позволяет оптимизировать производственный процесс и снизить операционные издержки при сохранении высокого уровня безопасности. На основе изученных данных и теоретических расчетов определены оптимальные параметры проектирования предлагаемых защитных устройств, обеспечивающие максимальную эффективность их функционирования в условиях подземных рудников при различных видах нагрузок. Результаты исследования применимы при проектировании новых и модернизации существующих шахтных стволов. Внедрение предложенного решения способствует повышению уровня промышленной безопасности и оптимизации производственных процессов на горнодобывающих предприятиях.

Ключевые слова: шахтное строительство, предохранительное устройство, целик, углубка вертикальных стволов, промышленная безопасность, горнопроходческие работы, проектирование защитных конструкций

Для цитирования: Волков ПВ, Пыталев ИА, Струков КИ, Кульсаитов РВ, Бикбов РИ. Технологические решения и конструкции предохранительных устройств при углубке шахтных стволов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):65-70. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-65-70>.

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AND DESIGNS OF SAFETY DEVICES IN SHAFT SINKING OPERATIONS

P. V. Volkov, I. A. Pytalev[✉], K. I. Strukov, R. V. Kulsaitov, R. I. Bikbov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nosov Magnitogorsk State Technical
University", Magnitogorsk, Russian Federation
[✉] vehicle@list.ru

Abstract: In the course of the study, an analysis of technological safety solutions for deepening vertical mine shafts was carried out. Methodological approaches to risk assessment and design of protective structures taking into account the specifics of underground space have been developed. An innovative safety device is proposed, which competes with the safety pillar in terms of dismantling efficiency. The implementation of this solution allows you to optimize the production process and reduce operating costs while maintaining a high level of safety. On the basis of the studied data and theoretical calculations, the optimal design parameters of protective devices are determined, ensuring the maximum efficiency of their functioning in the conditions of underground mines under various types of loads. The results of the study are applicable in the design of new and modernization of existing mine shafts. The implementation of the proposed solutions contributes to improving the level of industrial safety and optimizing production processes in the mining industry.

Keywords: mine construction, safety device, pillar, deepening of vertical shafts, industrial safety, mining and tunneling operations, design of protective structures

For citation: Volkov PV, Pytalev IA, Strukov KI, Kulsaitov RV, Bikbov RI. Technological solutions and designs of safety devices in shaft sinking operations. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):65-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-65-70>.

Введение

Углубка вертикальных стволов представляет собой сложный и опасный горнопроходческий процесс, связанный с возможным падением кусков руды и породы, а также других предметов с большой высоты [1]. Традиционные методы обеспечения безопасности, включающие использование искусственных предохранительных устройств, не всегда способны эффективно предотвратить такие ситуации, а значительное время, требуемое на их возведение и демонтаж, замедляет темпы углубки шахтных стволов, что и определило необходимость разработки и внедрения новых надежных и быстро возводимых предохранительных конструкций.

В настоящее время для обеспечения безопасности и темпов выполнения работ в качестве защитных сооружений применяются искусственные предохранительные устройства, представляющие собой конструкцию, созданную из специально подобранных материалов, способную выдерживать, согласно требованию правилам безопасности, значительные ударные нагрузки от аварийного падения подъемных сосудов [2].

Анализ конструктивных особенностей и преимуществ искусственных предохранительных устройств в качестве защитных сооружений с оценкой их эффективности и перспектив дальнейшего развития является актуальной научно-практической задачей.

Цель исследований: разработка технологических решений и конструкций предохранительных устройств при углубке вертикальных стволов шахт.

Объект исследований

Углубка вертикальных стволов сопряжена с рядом определенных рисков, связанных с изменчивостью горно-геологических условий и особенностью процессов организации и выполнения технологических операций [3].

При углубке вертикальных стволов с применением искусственного предохранительного устройства горно-геологические условия выступают ключевым фактором риска. Наличие трещиноватых, водообильных или склонных к горным ударам массивов значительно повышает вероятность обрушений и затоплений, ставя под угрозу безопасность рабочих и сохранность оборудования. Изучение геологического строения, гидрогеологических и горнотехнических условий, а также прогнозирования и последующий мониторинг горного давления является необходимым для выбора оптимальных способов крепления, водоотлива и разгрузки массива горных пород [4, 5].

Наряду с горно-геологическими факторами значительные риски связаны с организацией и выполнением техно-

логических процессов. При этом нарушение технологической последовательности, низкая квалификация персонала, отклонение от правил техники безопасности могут привести к ошибкам, поломкам и аварийным ситуациям. Тщательная разработка технологических регламентов, повышение квалификации персонала, обеспечение своевременного технического обслуживания оборудования, строгий контроль за соблюдением правил техники безопасности и оптимизация конструкции искусственного предохранительного устройства для обеспечения, бесперебойной работы и маневренности – это необходимые меры для минимизации организационных рисков и обеспечения безопасного выполнения работ по углубке шахтного ствола основываясь на свод правил¹.

Материал и методы исследования

Анализ опыта применения предохранительных устройств в качестве специализированных защитных сооружений для вертикальных стволов показал, что в основном применяются предохранительные перекрытия из железобетона, усиленные стальными балками. Дополнительно для защиты от возможного падения подъемных сосудов разрабатываются конструкции амортизирующих перекрытий, использующие принцип деформируемых элементов для поглощения энергии удара².

Для выполнения этих функций предохранительные устройства должны обладать следующими характеристиками:

- 1) высокой несущей способностью для сопротивления статическим и динамическим нагрузкам;
- 2) энергопоглощением для обеспечения амортизации при ударе и поглощения энергии от возможного падения подъемных сосудов;
- 3) надежностью и долговечностью для сохранности эксплуатационных свойств в процессе углубки ствола.

Материалы, предназначенные для создания предохранительных устройств, представлены в таблице 1.

В процессе проектирования для определения параметров искусственного устройства рекомендуется пользоваться методами динамического расчета, позволяющими определить нагрузки на элементы конструкции, возникающие при падении породы и руды или подъемного сосуда, и подобрать оптимальные материалы и различные их сочетания [6].

¹СП 91.13330.2012. Подземные горные выработки [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095532>.

²Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619572.

Таблица 1 / Table 1

Сравнительные характеристики материалов / Material Comparison

Материал	Преимущества	Недостатки	Методы защиты от негативных факторов	Примерный срок службы, лет
Бетон, железобетон	Прочность, высокая несущая способность, долговечность, монолитная конструкция	Вес, трудоемкость, коррозия, ограничение по изгибающим усилиям	Специальные покрытия, водонепроницаемый бетон, усиление металлическими элементами	20–50
Сталь	Прочность, пластичность, быстрый монтаж	Стоимость, коррозия, прочность сварных соединений, вес	Специальные покрытия и сплавы	15–30
Дерево	Пластичность, низкая стоимость, легкость монтажа, вес	Низкая прочность и долговечность, горючесть	Антисептик, огнезащита	До 2–3; до 5–10 (с обработкой)
Композиты	Прочность, низкая стоимость, вес, не подвержены коррозии	Сложность монтажа, низкие прочностные показатели на изгиб и срез	Нет необходимости	Не ограничен

Систематизация предохранительных устройств при углубке вертикальных стволов шахт

В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий на основании комплексного анализа геологических параметров, глубины разработки, интенсивности ведения работ, необходимости эксплуатации шахтного ствола и экономических показателей выбирается способ и устройство предохранительной конструкции³.

При крепких, устойчивых породах и небольшой глубине целесообразно использование естественных целиков, а при сложных геологических условиях и большой глубине – искусственных предохранительных конструкций [7].

Систематизация основных типов предохранительных устройств и их характеристики показаны в таблице 2.

Результаты исследований и их обсуждение

Авторами предложено предохранительное устройство для углубки вертикальных стволов шахт, которое направлено на повышение эффективности защиты горных выработок и персонала от возникновения аварий, связанных с падением кусков породы и руды или обрывом подъемных сосудов. Устройство обеспечивает безопасность ведения работ при углубке вертикальных стволов за счет амортизации и улавливания крупных кусков породы и предотвращает распространение ударной волны при падении скипа⁴. Конструкция предохранительного устройства при углублении вертикаль-

ных стволов шахт включает полку с размещенным над ним каркасом, представляющий собой несущую балочную металлическую конструкцию. Амортизирующий элемент выполнен в виде сложенных послойно брусьев, причем каждый последующий слой брусьев расположен перпендикулярно предыдущему. Над амортизирующим элементом установлена буферная бетонная распределительная плита со сквозным компенсационным отверстием со стороны подходной выработки [8–9].

Конструкции и параметры предохранительного устройства определяются такими характеристиками ствола, как глубина и диаметр, а также горно-геологическими условиями.

Конструкция предохранительного устройства представлена на рисунке.

В случае аварийного падения тяжелого предмета, например подъемного сосуда в ствол, он ударяется в буферную бетонную распределительную плиту 3. Она распределяет и частично гасит энергию удара за счет того, что тело давит на буферную распределительную плиту 3, она начинает прогибаться и в совокупности с бетоном 7 и арматурным каркасом 4 гасит энергию от падающего объекта. Далее задействуется амортизирующий элемент 2, расположенный на полке 1, который сжимается до упругого состояния и уже полностью останавливает подъемный сосуд, после падения предмет убирают.

После завершения работ по углублению вертикального ствола приступают к демонтажу предохранительного устройства. Работы начинаются с разбора подпорной стены 8 из бетонитовых блоков, расположенной между заявляемым устройством и подходной выработкой 9. Далее начинают демонтаж буферной бетонной распределительной плиты 3. Дробление бетона 7 производится с помощью отбойных

³Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024691583.

⁴Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 505. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372372/

Таблица 2 / Table 2

Систематизация предохранительных устройств и их характеристики /
Systematization of safety devices and their characteristics

Особенность	Породный целик	Искусственная конструкция
Принцип работы	В качестве предохранительного устройства для защиты персонала при действующем подъеме	В качестве предохранительного устройства для защиты персонала при действующем подъеме
Конструкция	Оставленный массив горных пород с различными элементами усиления: анкерами, балками, швеллерами	Возводимая конструкция, включающая защитные козырьки, полки, платформы, подвесные системы, комбинированные решения
Материалы	Горные породы	Бетон, железобетон, сталь, дерево, композитные материалы, комбинированные конструкции
Область применения	устойчивые горные породы, небольшая глубина, низкая интенсивность горного давления	неустойчивые горные породы, большая глубина, высокая интенсивность горного давления, наличие сложных геологических условий
Преимущества	Простота реализации, низкая стоимость	Возможность применения в сложных горно-геологических условиях, контролируемость конструкции и процессов деформирования, быстрота монтажа и демонтажа
Недостатки	Отсутствие структуры горных пород, слагающих предохранительный целик, невозможность прогнозируемости протекания геомеханических процессов	Высокая стоимость, сложность монтажа и демонтажа в стесненных условиях, необходимость регулярного обслуживания и контроля состояния
Основные риски	Частичное обрушение целика и потери несущей способности	Повреждение материалов и оборудования при монтаже и демонтаже в стесненных условиях
Меры безопасности	Тщательный геологический и геомеханический контроль состояния пород, применения дополнительных устройств усиления	При проектировании проведения детального инженерного расчета и моделирования применения качественных материалов, соблюдение технологической последовательности монтажа, мониторинг и обслуживание конструкции
Факторы выбора (обобщенно)	Необходимость эксплуатации подъема, технологические возможности, горно-геологические условия, устойчивость пород, глубина ствола, интенсивность работ, стоимость	

молотков слоями, начиная от сквозного компенсационного отверстия 6 и далее по сечению ствола. Отбитый бетон лопатами скидывают через сквозное компенсационное отверстие в плите 3.

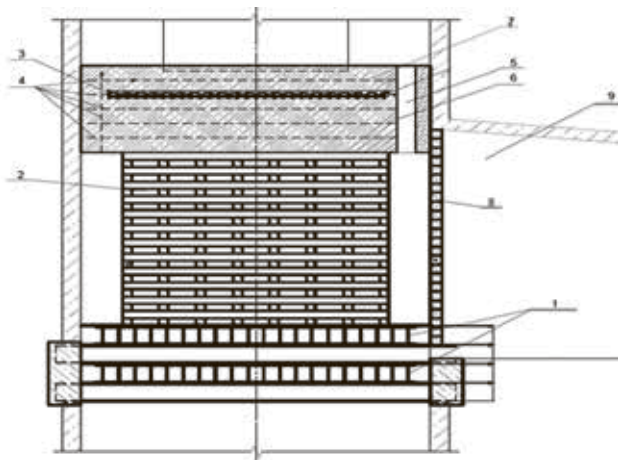


Рис. Предохранительное устройство: 1 – балка; 2 – амортизирующий элемент; 3 – распределительная плита; 4 – каркас; 5 – буферная плита; 6 – отверстия; 7 – бетон; 8 – подпорная стена; 9 – подходная выработка / Fig. Safety device: Drawing. Safety device: 1 – beam; 2 – shock-absorbing element; 3 – distribution plate; 4 – frame; 5 – buffer plate; 6 – holes; 7 – concrete; 8 – retaining wall; 9 – approach workings

При демонтаже буферной бетонной распределительной плиты 3 металлические элементы демонтируются, например, с использованием керосинореза. Керосинорезом срезается металлическая сетка арматурного каркаса. При производстве сварочных работ и резке металлов должны быть соблюдены требования⁵. Демонтаж амортизирующего элемента 2 начи-

⁵Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111644>.

нается с зачистки от бетона, отбитого от буферной бетонной распределительной плиты 3. После ликвидации амортизирующего элемента 2 производится зачистка поверхности несущих балочных конструкций 1, после чего начинают работы по демонтажу несущих балочных конструкций 1.

Предлагаемый способ позволяет повысить эффективность монтажа и демонтажа устройства за счет использования в качестве упругоподатливого материала брус, а также буферную распределительную плиту, что значительно сокращает трудозатраты и сроки монтажа и демонтажа предохранительного устройства [10].

Таким образом, оценка эффективности предохранительных устройств должна проводиться на основе анализа данных об аварийности на шахтах, возникающих рисках, а также моделирования и проведения испытаний предлагаемых конструкций.

Закключение

1. Применение искусственных предохранительных устройств в качестве защитных сооружений на примере изобретения «Предохранительное устройство для углубки вертикальных стволов шахт» представляет собой перспективное направление обеспечения безопасности и снижения сроков выполнения работ при углубке вертикальных стволов.

2. Устройство благодаря многослойной конструкции обладает значительными преимуществами по сравнению с имеющимися методами защиты.

3. Внедрение этого устройства позволит минимизировать последствия просыпей породы / руды и аварий с подъемными сосудами, снизить риски и повысить безопасность горнодобывающих работ.

4. Предложенная конструкция предохранительного устройства позволяет повысить эффективность эксплуатации ствола в период углубки, значительно упростить конструкцию и интенсифицировать ввод ствола в эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Харисов ТФ, Озорнин ИЛ. Обоснование эффективной технологии строительства сопряжений шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях. *Проблемы недропользования: рецензируемое сетевое периодическое научное издание*. 2015; 1(4): 84-90. [Kharisov TF, Ozornin IL. Substantiation of effective technology for the construction of conjugations of mine shafts in complex mining and geological conditions. *Problems of subsoil use: peer-reviewed network periodical scientific edition*. 2015; №1 (4): 84-90. (In Russ.)]. URL: <https://trud.igdur.ru>.
- Гавришев СЕ, Заляднов ВЮ, Курочкин АИ и др. Методика управления параметрами горнотехнической системы в динамике развития горных работ для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях рынка. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2024; 22 (4): 5-14. [Gavrishev SE, Zalyadnov VY, Kurochkin AI et al. The methodology of controlling the parameters of the mining engineering system in the dynamics of mining operations to ensure the sustainable functioning of a mining enterprise in changing market conditions. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov*. 2024; 22 (4): 5-14. (In Russ.)]. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14.
- Сентябов СВ. Анализ современного состояния строительства вертикальных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014; 7: 415-420. [Sentyabov SV. Analysis of the current state of construction of vertical trunks. *Mountain information and analytical bulletin*. 2014; 7: 415-420. (In Russ.)].
- Масленников СА. Оптимизация параметров технологии строительства вертикальных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015; 11: 17-23. [Maslennikov SA. Optimization of parameters of vertical trunk construction. *Mountain information and analytical bulletin*. 2015; 11: 17-23. (In Russ.)].
- Калмыков ВН, Зубков АА, Волков ПВ и др. Технологии механизированного крепления горных выработок усиленной комбинированной крепью с использованием самозакрепляющихся анкеров и набрызгбетона, наносимого способом «мокрого» набрызгбетонирования на подземных рудниках Урала. *Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2013: материалы Международной научно-практической конференции*. Одесса, 2013; 1 (3): 88-90. [Kalmykov VN, Zubkov AA, Volkov PV, et al. Technologies of mechanized fastening of mine workings with reinforced combined support using self-fixing anchors and sprayed concrete applied by the method of “wet” sprayed concrete in the underground mines of the Urals. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern Directions of Theoretical and Applied Research ‘2013»*. Odessa, 2013; 1 (3): 88-90. (In Russ.)].
- Першин ВВ, Копытов АИ, Фадеев ЮА и др. Обоснование конструкции предохранительных полков при углубке вертикальных стволов

шахт. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018; 2 (126): 38-45. [Pershin VV, Kopytov AI, Fadeev YuA, et al. Justification of the design of safety shelves when deepening vertical shafts. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018; № 2 (126): 38-45. (In Russ.)].

7. Копытов АИ, Першин ВВ, Войтов МД, и др. Разработка защитных устройств, технологии их сооружения и демонтажа при углубке вертикальных стволов. *Уголь*. 2015; 9: 51-55. [Kopytov AI, Pershin VV, Voitov MD, et al. Development of protective devices, technologies for their construction and dismantling when deepening vertical shafts. *Coal*. 2015; 9 51-55. (In Russ.)].

8. Волков ПВ, Бикбов РИ, Конев СВ и др. Технологические решения при проходке отрезных восстающих механизированным способом. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й Международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года*. Магнитогорск, 2025: 3. [Volkov PV, Bikbov RI, Konev SV, et al. Technological solutions for cutting-off risers by a mechanized method. *Actual problems of modern science, technology and education: Abstracts of the 83rd International Scientific and Technical Conference, Magnitogorsk, April 21-25, 2025*. Magnitogorsk, 2025: 3. (In Russ.)].

9. Войтов МД, Вети АА. Совершенствование параметров конструкций предохранительных устройств при углубке вертикальных стволов шахт. *Проблемы недропользования: сборник трудов научно-практической конференции*. Кемерово, 2014: 185. [Voitov MD, Veti AA. Improvement of parameters of structures of safety devices in the deepening of vertical shafts of mines. *Collection of proceedings of the scientific and practical conference «Problems of subsoil use»*. Kemerovo, 2014: 185. (In Russ.)].

10. Задорожный АМ, Липовик ВВ, Козариз ВЯ. Определение параметров движения свободного сосуда в стволе шахты. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 1979; 5: 24-28. [Zadorozhny AM, Lipovik VV, Kozariz VY. Determination of the parameters of the movement of a free vessel in the shaft of the mine. *Mining Journal*. 1979; 5: 24-28. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Павел Владимирович Волков –

канд. техн. наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: wolf1709@yandex.ru

Иван Алексеевич Пыталев –

д-р техн. наук, директор института горного дела и транспорта, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: vehicle@list.ru

Константин Иванович Струков –

д-р техн. наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: ugoldpr@ugold.ru

Равиль Вадимович Кульсаитов –

канд. техн. наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: ravil-ka90@mail.ru

Радмир Ильдарович Бикбов –

аспирант, ассистент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: bikbov.radmir08@gmail.com

Критерии авторства / Contribution: П. В. Волков – научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы; И. А. Пыталев – постановка исследовательской задачи, выводы; К. И. Струков – проведение исследований, обработка результатов; Р. В. Кульсаитов – обзор литературы, сбор и анализ данных; Р. И. Бикбов – анализ результатов исследования, написание текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи / P. V. Volkov – scientific management, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions; I. A. Pytalev – statement of the research problem, conclusions; K. I. Strukov – conducting research, processing the results; R. V. Kulsaitov – literature review, data collection and analysis; R. I. Bikbov – analysis of the results of the study, writing the text.

ABOUT THE AUTHORS

Pavel V. Volkov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Development of Mineral Deposits, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 455000, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: wolf1709@yandex.ru

Ivan A. Pytalev –

Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Mining and Transport, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 455000, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: vehicle@list.ru

Konstantin I. Strukov –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mineral Deposits Development, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 455000, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: ugoldpr@ugold.ru

Ravil V. Kulsaitov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 455000, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: ravil-ka90@mail.ru

Radmir I. Bikbov –

Postgraduate Student, Assistant of the Department of Mineral Deposits Development, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 455000, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: bikbov.radmir08@gmail.com

Конфликт интересов / Conflict of interest:

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.06.2025.

Поступила после рецензирования: 08.07.2025.

Принята к публикации: 22.08.2025.

Article info

Received: 11.06.2025.

Revised: 08.07.2025.

Accepted: 22.08.2025.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СКВАЖИН

Б. Н. Бухтояров^{1✉}, О. Р. Старикова¹,

В. Г. Петров², Д. В. Кудин³, А. А. Виноградова⁴

¹ООО «Газпром нефть шельф», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН
(ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Российская Федерация

³Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва, Российская Федерация

⁴Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

✉ z9851275712@gmail.com

Аннотация: Освещены вопросы использования в наклонно-направленном бурении (ННБ) моделей магнитного поля Земли и их параметров. Показаны примеры геомагнитных моделей, которые могут применяться в ННБ для проводки скважин и при определении их траекторий. Рассмотрены отечественные модели высокого разрешения, приведены их основные характеристики. Исследованы методы учета местных магнитных аномалий и вариаций переменного магнитного поля Земли для повышения точности проводки скважин. Исследование может быть полезным для специалистов маркшейдерских служб нефтегазовых компаний в вопросах обеспечения наклонно-направленного бурения геомагнитными данными.

Ключевые слова: исследование траектории скважин, проводка скважин, магнитное поле Земли, геомагнитные модели, наклонно-направленное бурение, параметры магнитного поля, IFR, IIFR

Для цитирования: Бухтояров БН, Старикова ОР, Петров ВГ, Кудин ДВ, Виноградова АА. Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 71-82. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-71-82>.

GEOMAGNETIC DATA FOR DIRECTIONAL DRILLING AND WELL POSITIONING

B. N. Bukhtoyarov^{1✉}, O. R. Starikova¹, V. G. Petrov²,

D. V. Kudin³, A. A. Vinogradova⁴

¹Gazprom Neft Shelf LLC, St. Petersburg, Russian Federation

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of
Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russian Federation

³Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS), Moscow, Russian Federation

⁴St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z9851275712@gmail.com

Abstract: The article covers the issues of using the Earth's magnetic field models and their parameters in directional drilling. Examples of geomagnetic models that can be used in directional drilling for drilling wells and determining their trajectories are shown. Domestic high-resolution models are considered, their main characteristics are given. Methods for accounting for local magnetic anomalies and variations in the Earth's variable magnetic field to improve the accuracy of well drilling are studied. The study can be useful for specialists of mine surveying services of oil and gas companies in matters of providing directional drilling with geomagnetic data.

Keywords: Well trajectory surveying, well wiring, Earth's magnetic field, geomagnetic models, directional drilling, magnetic field parameters, IFR, IIFR

For citation: Bukhtoyarov BN, Starikova OR, Petrov VG, Kudin DV, Vinogradova AA. Geomagnetic data for directional drilling and well positioning. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):71-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-71-82>.

Введение

До появления забойных телесистем (MWD) буровые работы приходилось останавливать для проведения измерений траектории скважины. В связи с высокой стоимостью бурения, особенно на шельфе, индустрия всегда стремилась минимизировать время, затрачиваемое на проведение исследований. Это привело к разработке приборов скважинной телеметрии, являющихся частью буровой компоновки и передающих данные на поверхность в процессе бурения при наращивании буровой колонны. Забойные телесистемы на основе магнитометров были включены в состав компоновки низа буровой колонны (КНБК), и по их измерениям стали вычисляться направление наклонно-направленных или горизонтальных скважин и положение забоя во время бурения.

Вскоре после этого в системах MWD стали использоваться гироскопические приборы, но необходимый компромисс между точностью и надежностью в сложных условиях бурения ограничил их применение относительно небольшими углами наклона. Только в последние годы удалось преодолеть технические ограничения для приборов MWD на основе гироскопов. Хотя гироскопы обладают рядом преимуществ по сравнению с приборами на основе магнитометров, их высокая стоимость и меньшая прочность позволяют приборам MWD на основе магнитометров по-прежнему оставаться наиболее распространенным методом исследования. Таким образом, направленная съемка по-прежнему во многом зависит от знания магнитного поля Земли.

Телесистема MWD включает в свой состав два набора датчиков: три магнитометра и три акселерометра, эти датчики служат для определения положения инструмента относительно магнитного и гравитационного полей Земли. Зная направление силовых линий этих полей, можно рассчитать наклон и направление бурового инструмента. Последовательное выполнение измерений MWD в процессе бурения позволяет определить траекторию скважины в пространстве.

Референсные параметры физических полей получают из соответствующих моделей – магнитных и гравитационных. Гравитационное поле достаточно хорошо изучено, статично и не вызывает существенных погрешностей в замерах MWD. Магнитное поле, напротив, – непостоянно, подвержено воздействию множества факторов и является одним из основных источников латеральной неопределенности положения скважин. Низкая точность траектории не позволяет достичь геологических целей бурения и, соответственно, проектных показателей добычи углеводородов, ведет к росту рисков промышленной безопасности, связанных с пересечением скважин, а также к снижению качества модельных построений.

В настоящее время увеличивается степень вовлеченности маркшейдерских служб нефтегазовых компаний в процессы управления траекториями направленных скважин, определения их пространственного положения и оценки их неопределенности.

Цель исследования

Помощь специалистам маркшейдерских служб нефтегазовых компаний в ориентировании в вопросах обеспечения бурения направленных скважин геомагнитными данными.

Материал и методы исследования

В целях исследования проведен анализ российских и зарубежных источников, документов Сообщества инженеров-нефтяников (SPE). Выделены основные темы, необходимые для понимания аспектов обеспечения геомагнитными данными процессов наклонно-направленного бурения. Освещены основы земного магнетизма: источники магнитного поля Земли, его параметры, проведен анализ используемых в ННБ геомагнитных моделей, в том числе созданных российскими научными организациями. Проанализированы методы создания локальных моделей магнитного поля, учитывающих местные магнитные аномалии и методы компенсации временных магнитных возмущений. Отдельно проведен анализ влияния геомагнитных возмущений на ННБ в высоких широтах.

Результаты исследований

Магнитное поле Земли и его состав

Геомагнитное поле распространяется от внешнего жидкого ядра до границы магнитосферы Земли (магнитопаузы). На расстоянии нескольких радиусов Земли геомагнитное поле определяется как дипольное, то есть как поле вокруг магнита, имеющего положительный и отрицательный полюса, поле наклонено относительно оси вращения Земли [1–3].

Вся совокупность современных данных о магнитном поле, полученных по измерениям магнитного поля на поверхности Земли и в околоземном пространстве, позволяет разделить геомагнитное поле на три основные части:

1. Главное поле и его вековые вариации, имеющие источники внутри Земли.
2. Аномальное поле, обусловленное совокупностью источников в тонком верхнем слое Земли.
3. Внешнее поле, связанное с внешними источниками: токовыми системами в околоземном пространстве.

Магнитное поле можно определить полным вектором B магнитной индукции, выраженным как векторная сумма вкладов от трех основных источников:

$$B = B_m + B_c + B_d,$$

где B_m – главное поле, генерируемое ядром Земли; B_c – поле земной коры; B_d – совокупное поле возмущения, вызванное электрическими токами в ионосфере и магнитосфере.

Главное, или нормальное, поле и его вековые вариации. Общеизвестной является теория образования основной части геомагнитного поля в недрах Земли, согласно которой жидкое внешнее ядро поддерживает электрический ток, благодаря динамо-эффекту. Медленное изменение основного поля (значений элементов магнитного поля) с течением времени называется вековым ходом или вековой вариацией.

Поле аномалий земной коры связано с намагниченностью земной коры по всей ее толщине приблизительно до 40 км. Эта часть спектра геомагнитного поля приурочена к интрузиям и более близкому к поверхности залеганию коренных пород. В областях с доминированием осадочных пород аномальное поле менее заметно. Аномалии могут вносить существенные искажения в направление и значение модуля индукции главного магнитного поля и таким образом создавать систематические ошибки в замерах MWD при бурении скважин.

Внешнее поле. Солнце излучает плазму, которая распространяется по Солнечной системе в виде солнечного ветра. Достигая магнитосферы Земли, солнечный ветер взаимодействует с геомагнитным полем, создавая электрические токи в околоземном пространстве и соответствующие «зеркальные токи», индуцированные в Земле и океанах. Изменения потока солнечного ветра приводят к флуктуациям этих токов, которые в конечном итоге создают поле возмущений, искажающих главное магнитное поле.

Вклад главного поля в геомагнитное поле на поверхности Земли составляет ~95 %, аномального поля ~4 %, внешнего поля ~1 %.

В таблице 1 приведены характеристики основных источников магнитного поля Земли.

Таблица 1 / Table 1
Основные источники магнитного поля /
Main sources of magnetic field

Источник магнитного поля	Амплитуда, нТл	Период изменения	Описание
<i>Внутренние (главное и аномальное поле)</i>			
Ядро	50 000	Годы	Модели главного поля
Литосфера	100–1 000	Века	Карты аномального поля, модели высокого разрешения
<i>Внешние (поле внешних возмущений)</i>			
Внешние возмущения (высокоширотные эффекты)	>1 000	Часы и дни	-
Внешние возмущения (среднеширотные эффекты)	10–200	Часы и дни	Модели ионосферного поля

Элементы земного магнетизма

Магнитное поле Земли в каждой точке пространства выражается вектором магнитной индукции, который имеет направление и силовую характеристику. Этот вектор может быть описан несколькими способами (рис. 1).

В сферических координатах, используемых в бурении, он определяется элементами D , I и B , где:

D – *склонение*, угол между магнитным и истинным севером, измеренный в горизонтальной плоскости, измеряется в градусах. Склонение положительно, когда магнитный север находится восточнее истинного севера, и отрицательно, когда западнее;

I – *наклонение*, угол между направлением местного магнитного поля и горизонтальной плоскостью, измеряется в градусах. К северу от магнитного экватора наклонение положительно, а к югу – отрицательно.

Склонение и наклонение задают направление вектора индукции.

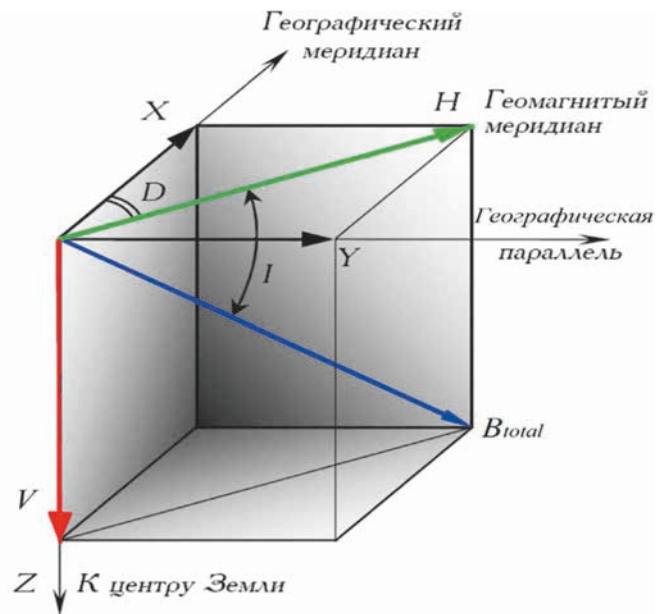


Рис. 1. Компоненты магнитного поля Земли /
Fig. 1. Components of the Earth's magnetic field

B (иногда обозначают как F) – модуль магнитной индукции (ранее использовался термин «напряженность поля»), является силовой характеристикой геомагнитного поля, единица измерения – нТл.

В научных целях для разложения вектора магнитной индукции на составляющие применяют прямоугольную систему координат, в которой ось X ориентирована по направлению географического меридиана, Y – по направлению параллели, а ось Z – направлена вниз.

Если поместить начало координат в точку наблюдения, то проекция вектора магнитной индукции на ось X будет называться северной составляющей (компонентой), проекция на ось Y – восточной составляющей и проекция на ось Z – вертикальной составляющей.

В некоторых случаях используется цилиндрическая система координат, в которой полный модуль магнитной индукции раскладывают на элементы H , Z и D . Проекцию вектора магнитной индукции на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей H , проекцию на вертикальную плоскость – вертикальной составляющей Z , и D – склонение, определяющее направление вектора в горизонтальной плоскости.

Приведенные ниже уравнения описывают взаимосвязь между элементами, используемыми в различных системах координат:

$$\begin{aligned} X &= H \cdot \cos D; \quad Y = H \cdot \sin D; \quad Z = H \cdot \operatorname{tg} I; \\ H &= \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \\ D &= \operatorname{arctg} \frac{Y}{X}, \quad I = \operatorname{arctg} \frac{Z}{H}. \end{aligned}$$

Сферический гармонический анализ

Наблюдения геомагнитного поля показали его зависимость от местоположения и времени. Для описания свойств магнитного поля Земли на основе измерений используется сферический гармонический анализ (СГА).

Первая попытка представления зависимости элементов магнетизма от координат точки была сделана в 1835 году в работе профессора Казанского университета И. Симонова

[4], при этом магнитное поле Земли предполагалось полем однородно намагниченного шара.

Следующим шагом в аналитическом представлении геомагнитного поля явилась теория К. Гаусса, предложенная в 1838 году [5]. Эта теория позволяет вычислять элементы земного магнетизма в любой точке поверхности и вне ее без объяснения физических причин возникновения самого поля при условии наличия данных о потенциале поля в отдельных его точках. Разложение магнитного потенциала в ряд сферических функций называется сферическим гармоническим анализом (СГА).

СГА является основным методом описания магнитного поля Земли, поэтому модели магнитного поля, как правило, представляют собой набор гармонических и весовых коэффициентов, которые определяются по координатам точки измерения и номеру гармоники. От количества исходных данных и охвата ими области распределения поля зависят достижимая степень гармонического разложения и точность моделирования [6–7].

Гармонические коэффициенты вычисляются из условия минимизации разности измеренных значений поля на сети измерений и значений, вычисленных по модели с этими коэффициентами, по методу наименьших квадратов.

Пространственное разрешение модели определяется количеством (порядком N) гармоник, например, при $N = 13$ требуется 195 коэффициентов и обеспечивается разрешение $\sim 3\,000$ км, при $N = 15$ требуется 255 коэффициентов и обеспечивается разрешение 2 600 км, при $N = 780 - 609\,960$ коэффициентов и 51 км, при $N = 1\,400 - 1\,962\,800$ коэффициентов и 28 км соответственно. Очевидно, что при увеличении N быстро возрастает число неизвестных (гармонических коэффициентов), что приводит к вычислительной трудности их определения.

На рисунке 2 представлен вклад сферических гармоник разной степени для моделей магнитного поля Земли.

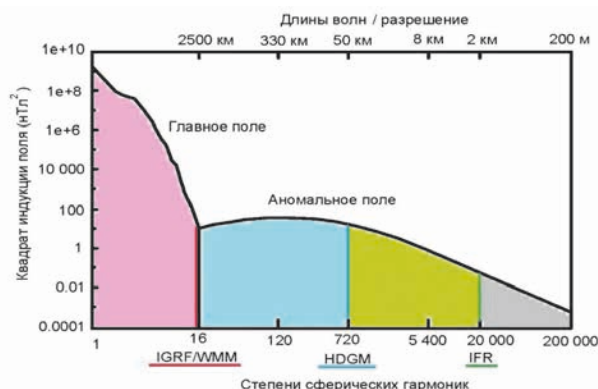


Рис. 2. Вклад сферических гармоник разной степени для моделей магнитного поля Земли /

Fig. 2. Contribution of spherical harmonics of different degrees for models of the Earth's magnetic field

Значимость теории Гаусса в настоящее время значительно возросла: измерения магнитного поля Земли ведутся из космоса, накоплен значительный массив данных приземных съемок (наземных, аэро- и гидромагнитных), появились компьютерные мощности для обработки больших объемов данных.

Модели магнитного поля

Существует множество математических моделей магнитного поля Земли: глобальных, региональных, локальных. Об-

щим для них является то, что они позволяют выполнить расчет значений элементов земного магнетизма с учетом координат и времени. При этом одни модели могут учитывать все три источника магнитного поля, другие – только главное поле [8].

Поле ядра Земли, длинноволновое, медленно меняющееся во времени поле, представлено глобальными спутниковыми моделями, такими как Международное эталонное геомагнитное поле IGRF (до 13-й степени гармоник) и Мировая магнитная модель WMM (до 15-й степени гармоник).

Модель магнитного поля CHAOS охватывает статичное поле ядра (сферические гармоники ≤ 15), свехкрупномасштабное поле земной коры (до сферических гармоник ~ 25), а также временные вариации векового хода (для сферических гармоник ≤ 20).

Литосферное магнитное поле в диапазоне самых длинных волн представлено сферическими гармоническими моделями, такими как WMMHR (данные спутниковой миссии CHAMP) и LCS-1 (данные миссий CHAMP и SWARM). Эти длинноволновые литосферные модели охватывают сферические гармоники до степеней 133 и 166 соответственно (разрешение ~ 300 и ~ 240 км).

Коммерческие модели HDGM и BGGM, исследовательская модель EMM, модели EMM-ИЗМИРАН и ГЦ РАН являются гибридными, они объединяют в себе спутниковые данные и данные приземных съемок. Длины волн короче 300 км в этих моделях получены путем сферического гармонического представления длинных волн глобальных моделей аномального поля, таких как EMAG2 или WDMAM, в итоге эти модели имеют степени гармонического разложения от 720 до 1 440 и пространственное разрешение $\sim 50-28$ км.

Глобальные модели аномального поля EMAG2 и WDMAM созданы с использованием данных приземных съемок и имеют пространственное разрешение ~ 4 км. Чтобы исключить в этих моделях временную зависимость (вековой ход), в них из реальных значений модуля магнитного поля вычитается модуль главного поля, описываемый первыми 15 гармониками. В таблице 2 представлены пространственные разрешения моделей магнитного поля Земли.

Таблица 2 / Table 2

Пространственное разрешение моделей магнитного поля Земли / Spatial resolution of the Earth's magnetic field models

Разрешение магнитных моделей по сферическим гармоникам и расстоянию (на экваторе)					
Глобальная модель или сетка	Масштабный диапазон моделей: светло-серый = спутниковые данные, темно-серый = приземные данные	Сферическая гармоника	Пространственное разрешение		
		Степень	Километры	Градусы	Минуты
WMM		2	16012.1	180.00	10800.0
		8	4709.4	45.00	2700.0
		12	3202.4	30.00	1800.0
		13	2965.2	27.69	1661.5
		15	2582.6	24.00	1440.0
IGRF		20	1952.7	18.00	1080.0
		50	792.7	7.20	432.0
CHAOS		100	398.3	3.60	216.0
		133	299.9	2.71	162.4
WMMHR		166	240.4	2.17	130.1
		300	133.2	1.20	72.0
LCS-1		500	80.0	0.72	43.2
		750	53.3	0.45	28.8
HDGM, EMM, ИЗМИРАН		790	50.6	0.46	27.3
		1050	38.1	0.34	20.5
ЦПАН		1440	27.8	0.25	15.0
		2000	20.0	0.18	10.8
BGGM		3000	13.3	0.12	7.2
		4000	10.0	0.09	5.4
		5000	8.0	0.07	4.3
		7000	5.7	0.05	3.1
		10000	4.0	0.04	2.2
WMM, EMAG2*					
* не являются моделями сферических гармоник					

Геомагнитные модели, используемые в наклонно-направленном бурении

При инклинометрии скважин глобальные геомагнитные модели используются для расчета опорных (референсных) значений компонент магнитного поля: D , I , B . Склонение D используется для пересчета азимута из магнитного в истинный, наклонение I и полный модуль индукции магнитного поля B используются как опорные значения для проверки качества измерений и как входные данные для алгоритмов коррекции измерений.

По классификации Руководящего комитета по точности позиционирования стволов скважин (ISCWSA SPE) используемые при наклонно-направленном бурении геомагнитные модели подразделяются на пять основных категорий [9]:

- низкого разрешения (IGRF, WMM) – главное поле, обновление реже чем 1 раз в год;
- стандартного разрешения (WMMHR, BGGM после 2019 г.) – главное поле + крупномасштабные аномалии, обновление ежегодно;
- высокого разрешения (HDGM, BGGM) – главное поле + глобальное поле аномалий высокого разрешения, обновление ежегодно;
- IFR1 (In-Field Referencing – 1) – главное поле + локальные аномалии, обновление ежегодно;
- IFR2 (In-Field Referencing – 2) – IFR1 + real-time коррекция внешнего поля, обновление 1 раз в минуту или чаще.

В таблице 3 приведены допустимые погрешности моделей магнитного поля Земли (МПЗ) для модели ошибок ISCWSA [6, 10, 11].

Таблица 3 / Table 3

Допустимые погрешности моделей магнитного поля Земли для модели ошибок ISCWSA / Acceptable errors of the EMF models for the ISCWSA error model

Модель	Погрешность модуля поля B , нТ	Погрешность магнитного наклонения I	Погрешность магнитного склонения D , °	Погрешность магнитного склонения, зависящая от горизонтальной составляющей вектора индукции, ° • нТ
HDGM	107	0,16	0,30	4 118
Standard	130	0,20	0,36	5 000
IGRF/WMM	157	0,24	0,43	6 029
IFR1	50	0,1	0,15	1 500
IFR2	45	0,08	0,15	1 250

Модель IGRF

Это самая известная и общедоступная глобальная модель магнитного поля Земли, зачастую используемая российскими нефтесервисными компаниями и операторами. IGRF является результатом международного сотрудничества экспертов в области моделирования магнитного поля и различных институтов, ведущих сбор и обработку геомагнитных данных со спутников и наземных станций по всему миру. IGRF создана и обновляется для того, чтобы предоставить пользователям удобный доступ к модели геомагнитного поля для областей, близких к поверхности Земли.

IGRF описывает только главное поле и не учитывает аномалии, вызванные намагниченностью земной коры, также в ней не учитываются системы электрических токов в маг-

нитосфере и ионосфере. Модель IGRF обновляется каждые пять лет и имеет степень сферического разложения до степени $N = 13$. На сайте ИЗМИРАН (<http://serv.izmiran.ru/webff/igrf-13gm.html>) в настоящее время доступен расчет элементов земного магнетизма по модели IGRF-14 на период 1935–2030 годов.

Модели WMM / WMMHR

Всемирная магнитная модель WMM (низкого разрешения) разработана совместно Национальным центром экологической информации США (NCEI) и Британской геологической службой (BGS), обновляется каждые пять лет и имеет степень сферического разложения до степени $N = 12$, разрешение $>3\ 000$ км.

Модель WMMHR по классификации ISCWSA относится к моделям стандартного разрешения, является усовершенствованной версией модели WMM и обеспечивает более детальное и точное описание геомагнитного поля. Она включает коэффициенты главного поля и вековых вариаций степеней $N = 1–15$, а также поля земной коры $N = 16–133$, имеет пространственное разрешение ~ 300 км. Модель разработана и поддерживается Национальным центром экологической информации США. Доступ к этим моделям свободный (www.ncei.noaa.gov).

Зарубежные коммерческие модели магнитного поля Земли высокого разрешения

Зарубежные компании чаще используют модели высокого разрешения:

- BGGM – поддерживается Британской геологической службой (BGS);
- HDGM – разработана и поддерживается Национальным центром экологической информации США (NCEI).

Эти модели обновляются ежегодно, учитывают главное магнитное поле, глобальное поле аномалий и модель среднего внешнего поля возмущений.

Обе модели в РФ в настоящее время официально недоступны.

Российские модели высокого разрешения

В настоящее время различными российскими научными организациями разработан ряд моделей МПЗ, которые отвечают требованиям классификации ISCWSA, предъявляемым к моделям высокого разрешения. Данные этих моделей могут быть предоставлены заказчику на договорной основе, форматы предоставления информации по элементам МПЗ обсуждаются в каждом случае индивидуально.

Модель CAMPUS – ГЦ РАН (Москва)

Серия моделей магнитного поля Земли CAMPUS ГЦ РАН включает в себя модели главного (CAMPUS-C) и литосферного, или аномального, поля (CAMPUS-A). Модель главного поля строится по спутниковым и обсерваторским данным до 15-й гармоники, а модель аномального поля – с 16-й до 1 050-й гармоники. В основе модели главного поля лежит модель-кандидат IGRF-14 [12], которая была подготовлена командой Геофизического центра РАН в 2024 году. Модель-кандидат ГЦ РАН прошла все этапы верификации рабочей группы по подготовке модели IGRF (рис. 3) и была использована при расчете коэффициентов модели на 2025–2030 годы.

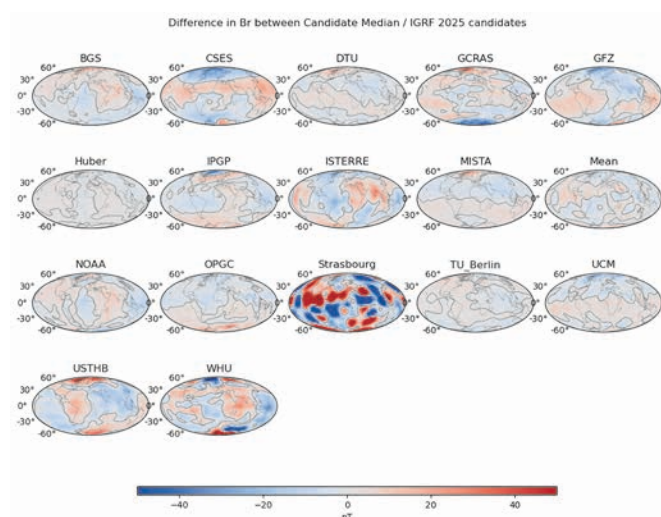


Рис. 3. Разность медианной модели с каждой моделью-кандидатом IGRF-14 /

Fig. 3. Difference of the median model with each IGRF-14 candidate model

Наиболее полная модель общего поля CAMPUS-CA построена 1 апреля 2025 года по данным спутниковых миссий за 2024–2025 годы. CAMPUS-CA аналогична гибридным моделям высокого разрешения HDGM и BGGM, включает в себя модель главного поля и глобальное аномальное поле, степень сферического разложения модели – 1 050, пространственное разрешение ~38 км. Для модели CAMPUS-CA совместно с АО «ИГиРГИ» была выполнена верификация на территории Западно-Сибирской платформы по специально разработанной методике, включающей площадные аэромагнитные съемки и наземные абсолютные наблюдения в нескольких точках на поверхности. Ведутся работы по приведению погрешностей модели в соответствие с моделью ошибок ISCWSA rev. 5 [11].

Доступные форматы предоставления данных:

- 1) отдельное программное обеспечение;
- 2) в виде динамических библиотек, встраиваемых в другое ПО;
- 3) внешний облачный сервис.

Модели ИЗМИРАН (Москва)

ИЗМИРАН – одна из старейших научных организаций РФ, ведущих работы в области земного магнетизма. Модели магнитного поля Земли, основанные на спутниковых данных и данных приземных съемок, институт разрабатывает с 1980-х годов.

В настоящее время построены следующие модели:

– ИЗМ2025 [13, 14] – построена по данным спутников SWARM за 2023–2024 годы на 1 января 2025 года. Модель включает до 15 гармоник (а не 13, как IGRF). Коэффициенты векового хода также вычислялись до 15-й гармоники для возможности объединения указанной модели с моделью EMAG2. Для повышения точности в северных районах модель включает высокоширотные данные, обычно исключаемые при построении моделей. Анализ точности модели ИЗМ2025 показал высокую степень сходимости с моделью IGRF-14;

– ЕММ-ИЗМИРАН – модель высокого разрешения, в которой первые 15 гармоник взяты из модели ИЗМ2025, а с 16-й по 790-ю – из модели ЕММ2017, пространственное разрешение – 50 км;

– ЕМAG2-ИЗМИРАН – модели с более высоким разрешением, строятся с использованием сетки глобальных аномалий EMAG-2 в виде таблиц значений магнитного склонения по заданной сетке для конкретного участка заказчика. Разрешение моделей ЕМAG2-ИЗМИРАН соответствует исходным данным и составляет ~4 км. Аномальное магнитное поле не является гармонической функцией, и при построении таких моделей производится преобразование модуля магнитного поля в компоненты, обычно сначала приближенно в Z-компоненту, затем последовательно уточняются X-, Y- и Z-компоненты. При расчетах необходимо использовать глобальные модели.

В ИЗМИРАН также разработаны методики, основанные на гармонических моделях, методе эквивалентного магнитного источника, а также на основе нейросетей, позволяющие выполнять расчеты карт X-, Y- и Z-компонент, склонения, наклонения и полного модуля индукции магнитного поля Земли с разрешением до 5 км, в том числе глубинных моделей уровня IFR1, используемых в наклонно-направленном бурении [15–17]. Предусмотрено предоставление данных в виде прикладного программного обеспечения.

В Санкт-Петербургском филиале ИЗМИРАН (СПбФ ИЗМИРАН) разработана методика расчетов компонент вектора индукции постоянного магнитного поля, вычисляемых по модульной информации, создана пополняемая база магнитометрических векторных данных всего земного шара, включающая в себя как материалы модульных и векторных съемок, так и расчетные значения компонент, вычисленных по измерениям модуля магнитного поля вблизи поверхности Земли. На ее основе в секторе магнитной картографии СПбФ ИЗМИРАН создана глобальная трехмерная векторная обновляемая модель МПЗ и реализована концепция расчета глобальной трехмерной модели угловых и прямоугольных компонент вектора индукции МПЗ. Модель не является гармонической. Расчет точности проводился в том числе путем сопоставления расчетных данных модели с данными наблюдений в мировой сети магнитометрических обсерваторий.

В таблице 4 приведены среднестатистические оценки расхождений между расчетными и измеренными значениями компонент МПЗ на Мировой сети геомагнитных обсерваторий по всему земному шару, колонки 4 и 5 рассчитаны с доверительной вероятностью 95 % [18].

Таблица 4 / Table 4

Оценка точности модели Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук / Assessment of the accuracy of the IZMIRAN SPbF model

Компонента МПЗ	Число обсерваторий (N)	Среднее значение расхождений	Доверительный интервал	Среднестатистическое значение расхождений расчетных данных	СКО расчетных данных и данных наблюдений
F	315	31 нТл	±14 нТл	31 ± 14 нТл	131 нТл
Z	279	9 нТл	±13 нТл	9 ± 13 нТл	110 нТл
H	299	11 нТл	±11 нТл	11 ± 11 нТл	100 нТл
D	267	0.01°	±0.02°	0.01 ± 0.02°	0.2°
I	310	0.01°	±0.02°	0.01 ± 0.02°	0.2°

В СПбФ ИЗМИРАН также накоплен опыт создания локальных глубинных моделей магнитного поля Земли на основе глобальной компонентной модели МПЗ, полевые данные подтверждают соответствие внедренных локальных моделей СПбФ ИЗМИРАН моделям IFR1 по классификации ISCWSA.

Локальные магнитные модели

Инструменты MWD являются проверенным и надежным средством точного позиционирования скважин при условии учета и минимизации двух источников ошибок:

- 1) ошибки привязки по склонению;
- 2) помехи, вызванные намагниченными элементами КНБК.

Ошибку склонения можно значительно снизить, уточнив местные геомагнитные параметры. Магнитное влияние КНБК устраняется аналитическими методами – «короткого НУБТ» (SCC) и многостанционного анализа (MSA). При этом эффективность SCC и MSA напрямую зависит от точности используемых геомагнитных параметров: полного модуля индукции и наклонения магнитного поля.

Повышение их точности достигается путем создания локальных геомагнитных моделей, по классификации ISCWSA – IFR1 (In-Field Referencing). Такие локальные модели учитывают влияние намагниченности горных пород на конкретном участке недр и предоставляют уточненные значения параметров магнитного поля для наклонно-направленного бурения. Минимальная точность таких моделей составляет: $0,15^\circ$ – для склонения; $0,1^\circ$ – для наклонения и 50 нТ – для полного модуля индукции магнитного поля. Использование IFR-моделей может приблизить точность позиционирования скважин к гироскопической без затраты времени и средств на дополнительные исследования, а также сократить/исключить случаи незапланированных срезок стволов скважин и перебуривания забракованных участков [19–20].

При этом в каждом конкретном случае создание IFR-модели должно быть обосновано, поскольку это всегда существенные финансовые затраты для нефтегазового проекта.

Создание такой модели может быть целесообразно в следующих случаях:

- наличие на участке аномалий, не учтенных в глобальных моделях, при которых замеры MWD систематически не укладываются в установленные критерии надежности измерений по B_{total} и Dip;
- небольшие размеры геологических целей (расчетный эллипсоид неопределенности (EQU) превышает размеры геологической цели) и (или) сложные горно-геологические условия (разломы и т. д.), требующие высокой точности проводки скважин;
- плотная сетка скважин на новом участке, бурение на шельфе с платформы или искусственного острова, уплотняющее бурение на действующем месторождении, когда критическое сближение эллипсоидов неопределенности, рассчитанных по глобальным моделям, не позволяет разместить скважины нужной протяженности там, где они необходимы, из-за риска их пересечения.

Зависимость неопределенности скважины от класса используемой модели приведена в таблице 5.

В случаях, когда экономически нецелесообразно создание IFR-модели (небольшой объем бурения), но требуется более точное позиционирование скважин, можно рассмотреть использование гироскопических измерений или точеч-

ные измерения параметров МПЗ в районе буровой площадки перед началом работ.

Таблица 5 / Table 5

Зависимость неопределенности скважины от класса используемой модели [21] /

Dependence of well uncertainty on the class of the model used [21]

Tool Code*	Опорная модель	Коррекция измерений	~EQU**
MWD + IGRF	IGRF или WMM	-	+10 %
MWD	BGGM или MVSD	-	Стандартный
MWD + HD	HDGM или BGGM	-	-10 %
MWD + IFR1	In-Field Referencing (IFR1)	-	-30 %
MWD + IFR1 + MSA	In-Field Referencing (IFR1)	MSA	-50 %

*Код ошибки для расчета позиционной неопределенности скважины.

**Приблизительные размеры эллипсоида неопределенности, фактические размеры зависят от географического местоположения и ориентации ствола скважины.

При создании IFR-моделей вычисляются аномалии параметров магнитного поля, создаваемого локальными источниками (намагниченными горными породами) внутри геомагнитного куба на основе известных параметров изучаемого объекта и свойств среды [22–23]. Для этого используют данные локальных приземных (наземных, аэро-, гидромагнитных) съемок. Дополнительное использование спутниковых данных и данных съемок на разных высотах позволяет охватить более широкий спектр магнитного поля и учесть большее число его источников и тем самым повысить точность модели.

Поскольку аномальное поле, в отличие от главного, изменяется во времени очень медленно, в качестве исходных данных могут использоваться данные магнитометрических съемок, выполненных на стадии поисково-оценочных и разведочных работ, что может существенно сократить расходы на создание IFR-модели. Для учета намагниченности горных пород и инверсии параметров магнитного поля на глубину необходим учет данных о геологическом строении земной коры.

При создании IFR-моделей могут использоваться следующие методы:

- нисходящего продолжения при помощи быстрых преобразований Фурье (FFT) – один из ранних методов, имеет ряд недостатков, нестабилен с увеличением глубины;
- эквивалентного источника;
- эллипсоидальных гармонических функций высоких степеней (метод запатентован Magnetic Variation Service LLC). Модель строится на основе комбинирования данных спутниковых и приземных съемок для более полного учета спектра поля земной коры. Если поле известно для большой территории, то решение дифференциального уравнения Лапласа для этой области позволяет выполнить разложение полного вектора геомагнитного поля на компоненты. Для решения уравнения Лапласа вектор магнитного поля сначала представляется как отрицательный градиент скалярного магнитного потенциала (уравнение Максвелла).

Метод эквивалентного источника включает в себя следующие этапы обработки:

Продолжение вниз аномалии полного вектора индукции

с высоты наблюдения до постоянной глубины при предположении, что нет магнитных источников выше самого глубокого уровня модели и величина аномалии гораздо меньше, чем величина общего магнитного поля Земли.

Вычисление X -, Y -, Z -компонент векторного поля из скалярной аномалии полной индукции.

Расчет локальных аномалий склонения и наклонения относительно направления главного магнитного поля из-за магнитной аномалии коры.

Для учета изменений главного поля и аномалий векового хода целесообразны создание и периодические наблюдения пунктов векового хода в районе работ.

После создания IFR-модели необходимо выполнить контрольную инструментальную съемку компонент МПЗ на площади ее действия и провести сравнение полученных параметров с предсказаниями модели.

Фактические параметры магнитного поля B и I также вычисляются в процессе взятия замеров MWD и должны использоваться для оценки корректности созданной IFR-модели после накопления представительной выборки и «очистки» замеров от магнитного влияния КНБК. Для визуализации может использоваться таблица (график) с границами приемки замеров по критериям контроля качества и распределением замеров относительно референсов модели.

Другой способ проверки корректности работы модели IFR – сравнение траекторий скважин, рассчитанных с помощью локальной модели, с траекториями тех же скважин, определенных с помощью гироскопа (при наличии достаточного количества таких измерений).

На сегодняшний день в Российской Федерации есть примеры успешного внедрения IFR-моделей для нефтегазового сектора, одна из них внедрена в 2022 году на полуострове Ямал ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск).

Учет влияния внешнего поля

Солнце является источником межпланетного магнитного поля, которое переносится потоком заряженных частиц – солнечным ветром. При достижении им магнитного поля Земли образуется ударная волна, сжимающая магнитное поле со стороны Солнца и растягивающая его с противоположной стороны. В результате магнитосфера становится асимметричной: со стороны Солнца магнитное поле простирается только на 10–13 радиусов Земли, с противоположной – образуется так называемый хвост магнитосферы, который вытянут до 1000 земных радиусов. При взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли возникают электрические токи, которые подвергаются флуктуации при изменении солнечного ветра и в итоге создают поле возмущений.

Из многочисленных исследований геомагнитных возмущений известны их характерные признаки, в первую очередь интенсивность, продолжительность протекания и пространственное распределение [24]. Установлено, что геомагнитные возмущения на поверхности Земли есть сумма эффектов различных источников, представляющих собой сложные системы токов, текущих в ионосфере и магнитосфере Земли. Структура и динамика токовых систем геомагнитных возмущений все еще недостаточно изучены, но некоторые их параметры достаточно твердо установлены.

На сегодня можно принять, что переменное магнитное поле состоит из следующих частей:

$$S + L + DP + DR + DCF + DT,$$

где S – регулярная часть поля, возникающая из-за волнового излучения Солнца, – токовая система, развивающаяся на освещенной стороне Земли на высоте слоя E ионосферы;

L – регулярная часть поля, возникающая из-за лунных приливов в верхней атмосфере, статистически выделяется методом наложения эпох по возможно большему периоду наблюдений, также приурочена к слою E ионосферы;

DP – нерегулярная часть поля, возникающая из-за корпускулярного излучения Солнца, токи развиваются в виде электроструй в зоне полярных сияний на высотах слоя E ионосферы;

DR – поле кольцевого тока, существенно усиливающегося в период магнитных бурь планетарного масштаба, токи развиваются во внешней части радиационных поясов Земли;

DCF – нерегулярная часть поля, возникающая из-за токов на поверхности магнитосферы при обтекании ее солнечным ветром.

Специалисты отрасли с 1990-х годов исследуют возможности учета изменений магнитного поля в пространстве и времени для повышения точности траекторий скважин. Одним из решений было наблюдение магнитного поля в нескольких точках в районе месторождения на протяжении определенного периода для установления базовых различий между магнитометром на месте установки и одной или несколькими стационарными обсерваториями, которые могут находиться на расстоянии нескольких сотен километров от места бурения. Данный подход получил название IFR (Interpolated In-Field Referencing или IFR2) и позволил существенно повысить точность проводки скважин [20].

Развитием метода интерполяции магнитного поля является учет изменений магнитного поля в реальном времени в процессе бурения. Такие интерполированные поправки в замеры MWD могут предоставлять обсерватории или вариационные станции, оснащенные оборудованием для определения компонент МПЗ и соответствующей сетевой инфраструктурой [25]. Метод эффективен, если буровая находится между двумя обсерваториями, расстояние до которых не превышает 300 км.

Качество компенсации ошибок возмущения магнитного поля в IFR зависит от четырех факторов:

1. Широты используемой обсерватории и буровой площадки.
2. Удаленности буровой площадки / вариационной станции от обсерватории.
3. Количества обсерваторий, используемых для интерполяции.
4. Качества данных обсерваторий или вариационных станций.

Метод функции возмущения (DF) является дальнейшим развитием метода IFR и устраняет некоторые его недостатки [26], используя более сложные алгоритмы обработки данных.

Авроральные электроджеты и их влияние на замеры MWD

Важной особенностью магнитосферы являются суббури, создающие значительные геомагнитные возмущения на авроральных широтах. Авроральной зоной называют широты, на которых наблюдается северное сияние. Они приурочены к области ~ с 65° по 75° геомагнитной широты вокруг се-

верного и южного полюсов, в которой электрическое поле магнитосферы проникает вдоль магнитных силовых линий в ионосферу.

В определенных условиях, когда в хвосте магнитосферы на ночной стороне накапливается много частиц солнечного ветра, ток в хвосте магнитосферы «замыкается» в ионосфере продольными токами. Внутри овала полярных сияний в полуночном секторе ионосферы формируется токовый канал, текущий с востока на запад, так называемый суббуревой электроджет (или авроральная электроструя), который и создает самые сильные вариации магнитного поля [27–28].

На рисунке 4 представлены результаты синхронных измерений магнитного склонения на разных широтах в обсерваториях Норвегии 13 июля 2025 года. Справа приведены трехбуквенные коды обсерваторий и значения их широты. На диаграмме отчетливо видна область возмущений магнитного поля в диапазоне широт, соответствующих авроральному овалу, характер возмущения типичен для суббуревой электроджета.

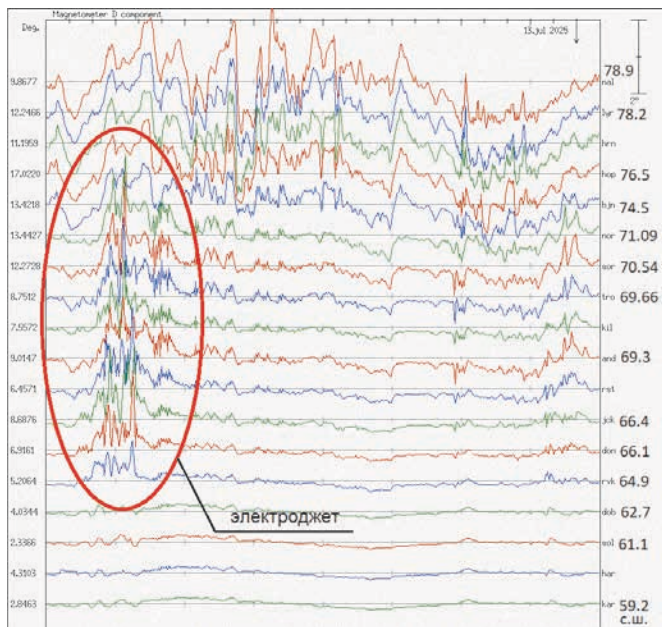


Рис. 4. Сводная диаграмма синхронных наблюдений магнитного склонения на различных широтах в обсерваториях Норвегии 13 июля 2025 года / Fig. 4. Summary diagram of synchronous observations of magnetic declination at different latitudes in observatories in Norway on 13.07.2025

В авроральных зонах магнитные суббури могут происходить ежедневно с амплитудами в сотни нТл и длиться более пяти часов. Зона влияния суббури вытянута вдоль геомагнитной широты.

Кроме суббурь в северных широтах наблюдаются пульсации сверхнизкой частоты, они обычно имеют периоды в несколько минут, могут быть непрерывными в течение всего дня и имеют амплитуды от 5 до 20 нТл.

В высоких широтах амплитуды возмущения в 50 нТл могут вызывать угловое изменение на $1/3$ градуса. Фактически во время возмущений, вызванных магнитными бурями, склонение может изменяться на несколько градусов и более [25].

Значительные геомагнитные колебания создают искажения параметров опорного поля и снижают точность определения направления скважины при навигации во время бурения. В регионе Баренцева моря периоды, когда нерегу-

лярный шум во внешнем магнитном поле превышает пределы погрешностей, заданных моделью MWD, составляют от 50 до 80 % дней [29]. Направление вектора магнитного поля в авроральной зоне может измениться на несколько градусов менее чем за час. Средние значения вариаций относительно спокойного уровня имеют смещение приблизительно на $0,5^\circ$, что может привести к значительной азимутальной ошибке. Величина и знак смещения склонения меняются в зависимости от долготы, широты и времени суток¹.

В высоких широтах горизонтальная компонента составляющей геомагнитного поля уменьшается, что усугубляет влияние большинства источников ошибок азимута в процессе съемки. Это крайне негативно сказывается на точности замеров MWD. Данные сети магнитных обсерваторий и вариационных станций очень важны для определения характеристик авроральных электроджетов и компенсации возмущений.

Вопросу поиска оптимального расстояния от буровой установки до обсерватории для обеспечения достаточного снижения помех на высокоширотной буровой установке посвящены независимые исследования различных групп экспертов [25–29, 33].

Выводы авторов сводятся к следующему:

1. Магнитные возмущения в Арктике имеют короткие корреляционные длины, поэтому обсерватории должны быть расположены достаточно близко к месторождению, чтобы обеспечить корректность поправок. Авроральные токи движутся вдоль геомагнитных широт, поэтому по направлению восток-запад корреляция лучше, чем по направлению север-юг.

2. Во время слабых или умеренных возмущений коррекция замеров может применяться на расстоянии до 500 км при условии, что буровая и обсерватория находятся на одной геомагнитной широте. Компенсация значительных возмущений (на $\sim 75\%$) может быть обеспечена при расстоянии до обсерватории < 100 км по направлению север-юг (или $\pm 1^\circ$ по геомагнитной широте), но в период, когда флуктуация электроджета происходит непосредственно над районом бурения и контрольной станцией, коррекция будет недоступна.

3. Компенсация возмущений по данным обсерватории, находящейся более чем в 600 км, вносит дополнительные ошибки, которые могут быть больше, чем некорректированное поле возмущений.

4. Возмущения магнитного склонения имеют большую корреляционную длину, чем искажения наклонения и общего поля. Поэтому корректировка значений склонения при использовании данных обсерватории будет более значительной, чем наклонения и модуля полной индукции.

Современные исследования [30] показывают, что в высоких широтах для достижения точности, предусмотренной стандартами ISCWSA для IIFR, необходимо использование поправок от удаленной не более чем на 100 км от буровой площадки обсерватории. При использовании вариационной станции, находящейся в районе буровой, необходимо чтобы

¹Значения вариаций склонения из-за суббуревой электроджета в Западной Сибири могут достигать значений от $-2,87^\circ$ до $1,84^\circ$, среднее отклонение – $0,48^\circ$. Вариации полного модуля индукции поля составляют более 1000 нТл, а средние отклонения – порядка 300 нТл [27].

она опиралась на данные обсерватории, удаленной от нее не более чем на 500 км. Вариационная станция без опоры на обсерваторию может в большей степени использоваться как индикатор возмущений для временной приостановки бурения. В связи с этим развертывание обсерваторий в северных областях авроральных геомагнитных возмущений является наиболее актуальной задачей [31, 32].

При использовании компонентных вариационных станций вместо обсерваторий в них необходимо обеспечить отдельный измерительный павильон со стабильным постаментом для феррозондового датчика, в котором поддерживается стабильная температура. Установка и ориентация датчика в этом случае выполняется после серии абсолютных наблюдений [29]. В процессе эксплуатации необходимы регулярное (не реже чем 1 раз в год) обслуживание вариационных станций профильными научными организациями, включающее абсолютные наблюдения, тщательную оценку точности получаемых с их помощью параметров магнитного поля и разработку соответствующих им отдельных моделей ошибок для расчета неопределенности положения скважин.

Основные рекомендации экспертов отрасли для проводки скважин в северной авроральной зоне:

1. Поскольку помехи от магнитного влияния буровой колонны (DSI) возрастают с увеличением широты, существует значительный потенциал для повышения точности позиционирования скважин за счет уменьшения DSI. Снижение DSI на 50 % улучшает латеральную точность позиционирования для горизонтально направленной скважины длиной 4 000 м примерно на 30 %.

2. Для обеспечения передачи данных о геомагнитном поле в реальном времени и их достоверности необходимо использовать одну или несколько обсерваторий как можно ближе к месту бурения (как это сделано на Аляске [25]). Для шельфовых месторождений это может включать установку магнитометрических датчиков на морском дне или на плавучем носителе.

3. Следует разрабатывать модели ошибок магнитного MWD, которые учитывают как случайные, так и систематические возмущения геомагнитного опорного поля.

4. Необходимо применять стандартные методики расчета азимута с достаточно хорошей магнитной изоляцией телесистемы в составе КНБК, особенно в восточно-западном направлении скважины. Метод MSA следует использовать преимущественно для статистической оценки качества замеров MWD.

5. Для обеспечения контрольных измерений азимутов целесообразно включать две независимые телесистемы MWD в КНБК с одинаковой точностью, а после завершения секции выполнять независимые замеры гироскопом [33].

Заключение и выводы

1. Магнитное поле Земли играет ключевую роль для навигации при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин, позволяя определять их траекторию, а также контролировать отклонение от проектного положения. Качество параметров, таких как магнитное склонение, наклонение и значение полного модуля индукции магнитного поля, оказывает прямое влияние на точность бурения и, следовательно, на эффективность добычи углеводородов и безопасность буровых операций. Использование точных геомагнитных данных в наклонно-направленном бурении является не только необходимостью, но и стратегическим преимуществом для компаний, стремящихся к оптимизации своих затрат.

2. Сложности использования магнитного поля Земли в качестве ориентира связаны с его изменчивостью во времени и пространстве, вызванной вековым ходом главного поля, магнитной неоднородностью земной коры и внешними возмущениями. При бурении скважин необходимо проводить оценку опорной модели магнитного поля, сравнивая ее параметры с данными MWD.

3. При повышенных требованиях к точности проводки скважин в сложных горно-геологических условиях или при уплотняющем бурении, снижение неопределенности их положения может быть достигнуто за счет уточнения параметров опорного магнитного поля. Внедрение моделей IFR1 и IFR2 позволяет учитывать влияние местных магнитных аномалий и внешних возмущений.

4. В настоящее время российские профильные научные центры готовы обеспечить отрасль геомагнитными данными высокого разрешения, а также предоставлять локальные геомагнитные модели (IFR1) и услуги коррекции геомагнитных данных в реальном времени (IFR2) для получения более точных параметров магнитного поля в процессе бурения. При этом в каждом случае создание IFR-моделей должно быть экономически обоснованным, а после внедрения созданные модели в обязательном порядке должны проходить валидацию на соответствие заявленным параметрам точности, так как необоснованное снижение параметров неопределенности несет в себе потенциальные угрозы безопасности.

5. При ведении буровых работ в высоких широтах необходимо учитывать особенности авроральных областей и обеспечивать наблюдения за изменениями магнитного поля по данным ближайшей обсерватории или вариационной станции, это позволит лучше понять причины несоответствия данных замеров приемочным критериям и принять обоснованные решения по дальнейшей проводке скважин. Поскольку от качества используемых моделей магнитного поля Земли напрямую зависит точность определения пространственного положения скважин, вопросы обеспечения геомагнитными данными наклонно-направленного бурения должны решаться маркшейдерскими подразделениями операторов добычи углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Яновский БМ. Земной магнетизм. Ленинград, 1978 [Yanovsky BM. Earth magnetism. Leningrad, 1978. (In Russ.)].
2. Малахов ВВ, Алексеев ВВ, Голубков ВС, и др. Магнитное поле во внутреннем околоземном пространстве. *Успехи физических наук*. 2023; 193: 1025–1046. [Malakhov VV, Alekseev VV, Golubkov VS, et al. Magnetic field in the inner near-Earth space. *Advances in physical sciences*. 2023; 193: 1025–1046. (In Russ.)]. DOI: 10.3367/UFNr.2022.12.039293.
3. Новиков КВ. Магниторазведка: Учебное пособие. Ч. 1. Москва, 2013. [Novikov K.V. Magnetic exploration: A tutorial. Part 1. Moscow, 2013. (In Russ.)].

4. Симонов ИМ. Опыт математической теории земного магнетизма. *Ученые записки Казанского университета*. 1835; 3. [Simonov IM. Experience of the mathematical theory of terrestrial magnetism. *Scientific notes of Kazan University*. 1835; 3. (In Russ.)].
5. Gauss CF. Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. *Resultate aus den Beobachtung des magnetischen Vereins im Jahre 1838*. Gottingen: Dieterichsche Buchhandlung, 1839; 1: 1-57.
6. Maus S, Nair M, Poedjono B, et al. High Definition Geomagnetic Models: A New Perspective for Improved Wellbore Positioning. *Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012. DOI: 10.2118/151436-MS.
7. Thébaud E, Hulot G, Langlais B, et al. A spherical harmonic model of Earth's lithospheric magnetic field up to degree 1050. *Geophysical Research Letters*. 2021; 48: e2021GL095147. DOI: 10.1029/2021GL095147.
8. Thébaud E, Finlay C, Beggan C, et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*. 2015; 67: 79.
9. Maus S, Nair M, Carande B, (et al). Systematic and Random Contributions to the Disturbance Field (IFR 2). *Paper presented at the Conference and Exhibition*. Amsterdam, 2014. DOI: systematic-and-random-contributions-to-the-disturbance-field-ifr-2-.pdf
10. Definition of the ISCWSA Error Model Revision 5.13 January 2023.
11. International Association of Geomagnetism and Aeronomy. 2024. IGRF-14. Zenodo. DOI: 10.5281/ZENODO.14012303.
12. Alken P, Thébaud E, Beggan CD, et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space*. 2021; 73 (49). DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.
13. Петров ВГ, Бондарь ТН. Построение пространственно-временной модели главного геомагнитного поля по спутниковым данным на эпоху 2015–2029 гг. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2024; 64 (1): 133-140 [Petrov VG, Bondar TN. Construction of a spatio-temporal model of the main geomagnetic field based on satellite data for the epoch 2015-2029 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024; 64 (1): 133-140. (In Russ.)].
14. Rytov RA. Artificial Neural Network for Downward Continuation of Anomalous Magnetic Fields. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; 25 (2): 5. DOI: 10.2205/2025ES000996
15. Rytov RA, Petrov VG. Application of Artificial Neural Networks for Reconstruction of Vector Magnetic Field from Single-Component Data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024; 64 (6): 912-919. DOI: 10.1134/S0016793224600425.
16. Rytov RA, Usov NA, Petrov VG. Vector Magnetic Field Reconstruction from Single-Component Data Using Evolutionary Algorithm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024; 64 (3): 427-435. DOI: 10.1134/S0016793224600164.
17. Копытенко ЮА, Петрова АА. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016; 9 (2): 88-96 [Kopytenko YuA, Petrova AA. Development and use of a component model of the Earth's magnetic field for magnetic cartography and geophysics. *Fundamental and applied hydrophysics*. 2016; 9 (2): 88-96. (In Russ.)].
18. Kabirzadeh H, Rangelova E, et al. Dynamic Error Analysis of Measurement While Drilling Using Variable Geomagnetic In-Field Referencing. *SPE J*. 2018; 23: 2327-2338. DOI: 10.2118/188653-PA.
19. Russell JP, Shiells G, Kerridge DJ. Reduction of Well-Bore Positional Uncertainty Through Application of a New Geomagnetic In-Field Referencing Technique. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, 1995. DOI: 10.2118/30452-MS.
20. Maus S. Managing Main & Crustal Magnetic Fields and New Developments in Global Magnetic Modeling. *Paper presented at the Conference ISCWSA-41*. London, 2015. URL: <https://www.iscwsa.net/media/files/files/a97d5291/managing-main-crustal-magnetic-fields-and-new-developments-in-global-magnetic-modeling.pdf>
21. Poedjono B, Montenegro D, Clark P, et al. Successful Application of Geomagnetic Referencing for Accurate Wellbore Positioning in a Deepwater Project Offshore Brazil. *Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012. DOI: 10.2118/150107-MS
22. Waag T, Torkildsen T, Inderhaug O, et al. Local Geomagnetic Field Modelling Closes the Gap Between MWD and Gyro Directional Surveying. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, 1999. DOI: 10.2118/56699-MS.
23. Амиантов АС, Зайцев АН, Одинцов ВИ и др. Вариации магнитного поля Земли. Москва, 2001 [Amiantov AS, Zaitsev AN, Odintsov VI, et al. Variations of the Earth's magnetic field. Moscow, 2001. (In Russ.)].
24. Poedjono B, Beck N, Buchanan A, et al. Geomagnetic Referencing in the Arctic Environment. *Paper presented at the OTC Arctic Technology Conference*. Houston, Texas, USA, 2012. DOI: 10.4043/23729.
25. Mitkus A, Willerth M, Reetz A, et al. Challenges and Solutions for Accurate Wellbore Placement in the Barents Sea. *Paper presented at the SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*. Hague, Netherlands, 2019. DOI: 10.2118/194067-MS.
26. Edvardsen I, Johnsen MG, Løvhaug UP. Effects of substorm electrojet on declination along concurrent geomagnetic latitudes in the northern auroral zone. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2016; 6:37. DOI: 10.1051/swsc/2016031
27. Edvardsen I. Effects of Geomagnetic Disturbances on Offshore Magnetic Directional Wellbore Positioning in the Northern Auroral Zone. *A dissertation for the degree of Philosophiae*. 2015.
28. Edvardsen I, Nyrnes E, Johnsen M, et al. Improving the Accuracy and Reliability of MWD Magnetic Wellbore Directional Surveying in the Barents Sea. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, 2013. DOI: 10.2118/166226-MS.
29. Beggan C, Clarke E, Knight, P, et al. Assessing the Absolute and Relative Accuracy of Magnetic Variometers Compared to Observatory Data for IFR2. DOI: 10.2118/223681-MS.
30. Соловьев АА. Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения. *Вестник РАН*. 2024; 94: 10: 871-877. [Soloviev AA. Geomagnetic support of directional drilling. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2024; 94: 10: 871-877. (In Russ.)]. DOI: 10.31857/S0869587324100023.
31. Соловьев АА, Сидоров РВ, Ощенко АА, Зайцев АН. О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в российской Арктике. *Физика Земли*. 2022; 3: 136-152. [Soloviev AA, Sidorov RV, Oshchenko AA, Zaitsev AN. On the need for high-precision monitoring of the geomagnetic field during directional drilling in the Russian Arctic. *Physics of the Earth*. 2022; 3: 136-152. (In Russ.)]. DOI: 10.31857/S0002333722020120.
32. Poedjono B, Chandrasekharan M. Effective Monitoring of Auroral Electrojet Disturbances to Enable Accurate Wellbore Placement in the Arctic. *Paper presented at the OTC Arctic Technology Conference*. Houston, Texas, 2014. DOI: 10.4043/24583-MS.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Николаевич Бухтояров –

начальник отдела маркшейдерско-геодезических работ,
ООО «Газпром нефть шельф», 191186, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: z9851275712@gmail.com

Валерий Григорьевич Петров –

канд. физ.-мат. наук, научный руководитель направления
«Магнетизм Земли и планет», Институт земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
имени Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), 108840, г. Москва,
г. Троицк, Российская Федерация, e-mail: vpetrov@izmiran.ru

Дмитрий Владимирович Кудин –

канд. техн. наук, заведующий сектором геофизического
мониторинга, Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), 119296,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: d.kudin@gcras.ru

Оксана Рашитовна Старикова –

заместитель начальника отдела маркшейдерско-
геодезических работ ООО «Газпром нефть шельф»,
191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail:
oxy3791@gmail.com

Анастасия Алексеевна Виноградова –

студентка 5-го курса, Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-
Петербург, Российская Федерация,
e-mail: Vinog_Nas02@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Б. Н. Бухтояров – написание текста статьи, сбор и анализ данных, выполнение работы по систематизации материала; В. Г. Петров – написание текста статьи в части описания создания моделей, описание моделей ИЗМИРАН; Д. Г. Кудин – написание статьи в части описания моделей ГЦ РАН, учета влияния внешнего поля; О. Р. Старикова – участие в создании концепции статьи, сборе и анализе данных, редактирование текста статьи; А. А. Виноградова – сбор и анализ исходных данных, перевод зарубежных материалов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи / B.N. Bukhtoyarov – writing the text of the article, collecting and analyzing data, performing work on the systematization of the material; V. G. Petrov – writing the text of the article in terms of describing the creation of models, describing models from the Russian Academy of Sciences; D. G. Kudin – writing the article in terms of describing models of the GC RAS, taking into account the influence of the external field; O. R. Starikova – participation in creating the concept of the article, collecting and analyzing data, editing the text of the article; A. A. Vinogradova – collecting and analyzing source data, translating foreign materials. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 31.07.2025.

Поступила после рецензирования: 02.08.2025.

Принята к публикации: 09.08.2025.

Article info

Received: 31.07.2025.

Revised: 02.08.2025.

Accepted: 09.08.2025.

ABOUT THE AUTHORS

Boris N. Bukhtoyarov –

Head of Surveying and Geodesy Department, Gazprom Neft
Shelf LLC, 191186, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: z9851275712@gmail.com

Valery G. Petrov –

Cand. Sci. (Phys. and Math.), Scientific Director of the
Department Magnetism of the Earth and Planets, Pushkov
Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave
Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN),
108840, Moscow, Troitsk, Russian Federation, e-mail: vpetrov@
izmiran.ru

Dmitry V. Kudin –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Geophysical Monitoring Sector,
Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC
RAS), 119296, Moscow, Russian Federation,
e-mail: d.kudin@gcras.ru

Oksana R. Starikova –

Deputy Head of the Surveying and Geodesy Department of
Gazprom Neft Shelf LLC, 191186, St. Petersburg, Russian
Federation, e-mail: oxy3791@gmail.com

Anastasia A. Vinogradova –

5th year Student, St. Petersburg Mining University of Empress
Catherine II, 199106, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: Vinog_Nas02@mail.ru

ПРОВЕДЕНИЕ МАРКШЕЙДЕРСКИХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГЛЯ ШАХТНЫМ СПОСОБОМ

И. М. Величко✉

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

✉ ivan.velichko98@gmail.com

Аннотация: Подземная разработка угольных месторождений сопровождается большим количеством рисков, одним из которых является самовозгорание угля, приводящее ко многим негативным последствиям. Поэтому с целью предотвращения отрицательного влияния возникающих рисков проводятся маркшейдерские наблюдения за деформациями земной поверхности, которые являются следствием очагов подземных пожаров. В работе освещены вопросы внедрения метода радарной интерферометрии в комплекс маркшейдерских работ по проведению мониторинга деформаций земной поверхности в зоне разработки угольных месторождений. В статье рассмотрены характеристики и принцип действия радарной интерферометрии. Представлен пример исследования взаимосвязи подземных пожаров и возникающих из-за них деформаций земной поверхности. Показана схема применения радарной интерферометрии в маркшейдерском мониторинге вертикальных оседаний земной поверхности. Предложен алгоритм выполнения маркшейдерских работ с применением радарной интерферометрии с целью обнаружения очагов самовозгорания угля. Данная статья будет являться материалом для развития дальнейших исследований характеристик радарной интерферометрии и ее применения в маркшейдерской деятельности.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, подземный пожар, маркшейдерский мониторинг, земная поверхность, деформации, самовозгорание угля

Благодарности: Автор выражает благодарность научному руководителю канд. техн. наук, доценту кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института НИТУ «МИСИС» Г. О. Абрамьяну за помощь в подготовке текста статьи и ценные рекомендации.

Для цитирования: Величко ИМ. Проведение маркшейдерских работ с использованием радарной интерферометрии для выявления подземных пожаров при разработке угля шахтным способом. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):83-87. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-83-87>.

CONDUCTING MINE SURVEYING USING RADAR INTERFEROMETRY TO DETECT UNDERGROUND FIRES DURING COAL MINING

I. M. Velichko✉

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ ivan.velichko98@gmail.com

Abstract: Underground mining of coal deposits is accompanied by many risks, one of which is spontaneous combustion of coal, leading to many negative consequences. Therefore, in order to prevent the negative impact of emerging risks, surveying observations of deformations of the Earth's surface, which are the result of underground fires, are carried out. The paper highlights the issues of introducing the radar interferometry method into a complex of surveying operations to monitor deformations of the Earth's surface in the coal mining area. The article discusses the characteristics and operating principle of radar interferometry. An example of a study of the relationship between underground fires and resulting deformations of the Earth's surface is presented. The scheme of application of radar interferometry in the surveying monitoring of vertical subsidence of the Earth's surface is shown. An algorithm for performing surveying operations using radar interferometry is proposed in order to detect spontaneous combustion of coal. This article will be a material for the development of further research on the characteristics of radar interferometry and its application in surveying activities.

Keywords: radar interferometry, underground fire, surveying, earth surface, deformations, spontaneous combustion of coal

Acknowledgments: The author expresses gratitude to his scientific supervisor, PhD, Associate Professor of the Department of Geology and Surveying at the NUST MISIS Mining Institute, G. O. Abramyan, for his help in preparing the text of the article and valuable recommendations.

For citation: Velichko IM. Conducting mine surveying using radar interferometry to detect underground fires during coal mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):83-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-83-87>.

Введение

При подземной разработке угольных месторождений велика вероятность возникновения самовозгорания угля, что является причиной появления подземных пожаров. Воспламенение угля приводит к взрыву газоземной смеси, разрушению горных выработок, травмированию и гибели рабочих и другим катастрофическим последствиям [1]. Подземные пожары также приводят к существенным экономическим потерям [2].

Повышение температуры из-за горения угля может приводить к снижению прочностных характеристик и разрушению горных пород, слагающих почву, кровлю и бока горных выработок. Такие процессы являются причиной возникновения деформаций земной поверхности, которые приводят к негативным последствиям. Поэтому проведение мониторинга оседаний земной поверхности является одной из главных задач, стоящих перед маркшейдерской службой любого горного предприятия. Качественный маркшейдерский мониторинг оседаний земной поверхности – это важнейший аспект, обеспечивающий стабильное и надежное функционирование горнодобывающей отрасли [3].

Помимо традиционных маркшейдерских методов наблюдений за деформациями земной поверхности существует метод радарной интерферометрии. Радарная интерферометрия находит применение в маркшейдерской деятельности. Данный метод позволяет давать достаточно точные результаты измерений. Традиционный метод нивелирования не может предоставить необходимое количество данных об оседаниях земной поверхности на обширных территориях за короткий промежуток времени. В связи с этим радарная интерферометрия используется в качестве дополнительного инструмента к традиционным методам мониторинга земной поверхности.

Цель исследования: анализ возможности применения радарной интерферометрии в маркшейдерском мониторинге деформаций земной поверхности, возникающих на участках развития подземных пожаров при добыче угля шахтным способом.

Методика исследований

Характеристики и принцип радарной интерферометрии

Радиолокационные системы, функционирующие на основе метода интерферометрии с синтезированной апертурой (InSAR), работают в режиме удаленного доступа. Они обеспечивают возможность получения данных с земной поверхности с периодичностью в несколько дней, что позволяет осуществлять значительное количество измерений с еженедельным обновлением информации [4]. При этом качество съемки почти не зависит от погодных условий и времени суток [5].

Мониторинг деформаций земной поверхности с помощью радарной интерферометрии представляет собой регулярный процесс, направленный на отслеживание состояния изучаемых объектов. Для большей части территории Рос-

сийской Федерации это возможно благодаря данным, получаемым со спутников Sentinel-1A/B, которые используют радар С-диапазона с длиной волны 5,6 см. Дифференциальная радарная интерферометрия (ДРИ) – это метод, который используется для измерения разницы в расстоянии между двумя точками на земной поверхности. Эти точки находятся на разных орбитах и измеряются с помощью спутникового радара. Суть метода заключается в том, что радар измеряет расстояние от спутника до поверхности Земли в двух точках, которые расположены близко друг к другу. Измерения проводятся во время последовательных пролетов спутника над этими точками [6].

Для вычисления смещений используются исходные данные, полученные после первичной обработки. Эти данные представляют собой снимки, на которых зафиксирована амплитуда и фаза отраженного от поверхности Земли сигнала. В результате получается векторная точечная карта. Для каждой точки определен набор характеристик, к которым относятся: географические координаты, отклонение от цифровой модели рельефа на момент съемки, средняя скорость изменения вертикальных смещений (мм/год) и другие параметры. Размеры конечного разрешения составляют 20×20 м на точку. Таким образом, каждая точка является интегральным показателем смещения в пределах квадрата. Этот показатель представляет собой усредненное значение изменения поверхности [7].

Взаимосвязь самовозгорания угля и деформаций земной поверхности

В исследованиях отечественные и зарубежные ученые рассматривали тему воздействия самовозгорания угля на формирование деформаций земной поверхности. В их работах рассматривалась взаимосвязь между температурными показателями и вертикальными оседаниями земной поверхности.

Самовозгорание угля представляет собой сложный физико-химический процесс, обусловленный внутренними изменениями в структуре материала и внешними условиями окружающей среды. Возможность самопроизвольного горения угля определяется совокупностью его структурных характеристик и параметров внешней среды [8]. Причиной самовозгорания угля являются процессы окислительных реакций в самом его веществе. При этом повышается температура и выделяется тепловая энергия. Длительное развитие таких процессов приводит к повышению температуры до предельных значений и резкому выделению тепла. В результате возникает воспламенение угля.

Наличие трещиноватости, пористости, разрыхления угля является главной причиной поступления кислорода внутрь угольного пласта. При контакте кислорода с угольными частицами активизируются окислительные процессы. Также причинами самовозгорания угля могут быть высокая влажность воздуха и угля и присутствие примесей, которые принимают участие в окислительных реакциях [9].

Существует высокая корреляция между зонами смещений и зонами температурных аномалий. Это объясняется изменением скорости геомеханических процессов, вызванных развитием подземных пожаров, и связанными с ними тепловыми аномалиями [10].

Так, в рамках научного исследования [11] был проведен анализ комплексного применения радарных и мультиспектральных данных для изучения деформаций и температурных характеристик земной поверхности. В ходе исследования использовались интерферометрические снимки, полученные с помощью спутника Sentinel-1B, а также данные о температуре земной поверхности, собранные спутником Landsat-8.

На основании полученных данных было выполнено сопоставление карт вертикальных смещений и температурных аномалий поверхности. В результате анализа композитного изображения исследуемой территории были сделаны следующие выводы:

1. Были идентифицированы два участка, характеризующиеся повышенными температурами и значительными вертикальными оседаниями земной поверхности.

2. Оба выявленных участка расположены на склонах отвалов.

Таким образом, в указанных зонах существует потенциальная угроза возникновения подземных пожаров, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных маркшейдерских инструментальных наблюдений.

Причиной поверхностной ползучести, из-за которой возникают деформации земной поверхности, являются подземные термические воздействия. При этом изменение величин деформаций колеблется в пределах нескольких миллиметров в течение года. Для обнаружения таких небольших величин деформаций оптимально применение метода последовательной интерферометрии постоянных рассеивателей радарного сигнала (permanent scatterer – PS) [12].

Интерферометрия постоянных рассеивателей (PSI) – это инновационный подход к обработке данных, полученных с помощью радиолокационных методов. Он позволяет измерять и отслеживать изменения положения и формы точек на поверхности Земли, которые постоянно рассеивают радиосигнал. Обычно такими точками являются здания и другие искусственные объекты [13].

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлен метод применения радарной интерферометрии для обнаружения очагов самовозгорания угля при подземной разработке.

С помощью спутников 1 и направленных от них в сторону исследуемого объекта радиоволн 2 определяется фаза отраженного от земной поверхности радиолокационного сигнала 3. Затем по разности фаз отраженного сигнала от земной поверхности соответственно при начальном 11 и конечном 10 ее положении определяется вертикальное смещение 4 земной поверхности. Вертикальное смещение возникает вследствие разрушения массива горных пород 5 из-за воздействия развивающегося подземного пожара 7 в призабойном пространстве при разработке очистного забоя 8. Для воплощения концепции, представленной на рисунке 1, требуется тщательное планирование и организация процесса маркшейдерских работ.

На рисунке 2 представлена методологическая последова-

тельность выполнения маркшейдерских наблюдений за деформациями земной поверхности с применением радарной интерферометрии, которая обеспечивает возможность предварительного проектирования и реализации мероприятий по обнаружению потенциальных очагов подземных пожаров.

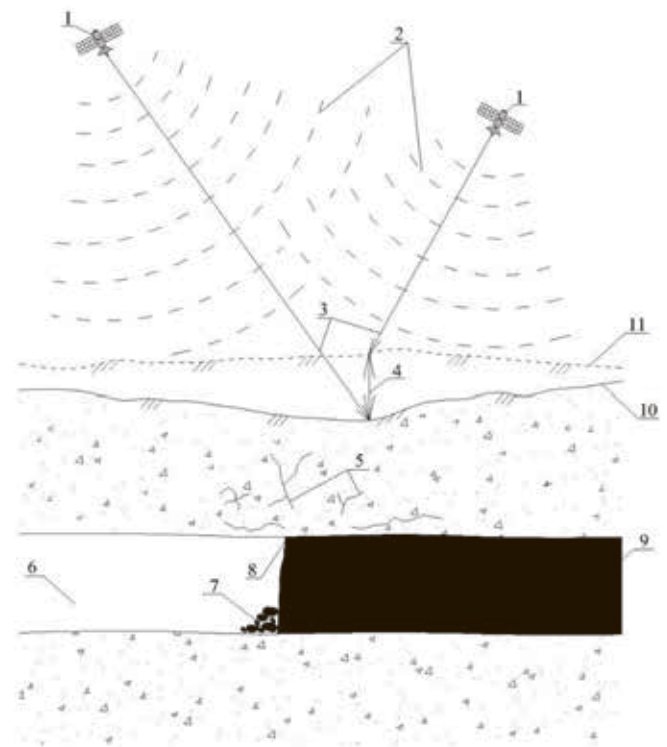


Рис. 1. Применение радарной интерферометрии при обнаружении очагов самовозгорания угля: 1 – спутники; 2 – радиоволны; 3 – направление радиолокационных сигналов; 4 – вертикальное смещение земной поверхности; 5 – участок разрушения массива горных пород из-за термических воздействий; 6 – выработанное пространство; 7 – очаг самовозгорания угля в призабойном пространстве; 8 – очистной забой; 9 – угольный пласт; 10 – конечное положение участка земной поверхности; 11 – начальное положение участка земной поверхности / Fig. 1. The use of radar interferometry in detecting spontaneous combustion of coal: 1 – satellites; 2 – radio waves; 3 – direction of radar signals; 4 – vertical displacement of the Earth's surface; 5 – site of destruction of the rock mass due to thermal effects; 6 – depleted space; 7 – spontaneous combustion of coal in the bottomhole space; 8 – sewage treatment plant; 9 – coal seam; 10 – the final position of a section of the earth's surface; 11 – the initial position of a section of the earth's surface

Схема алгоритма проведения маркшейдерских работ при обнаружении очагов подземных пожаров с помощью радарной интерферометрии следующая:

1. *Выполнение мониторинга оседаний земной поверхности на территории угольного предприятия.* Проводятся циклы мониторинга, в ходе которых с помощью радарной интерферометрии определяются значения вертикальных оседаний земной поверхности. Затем результаты измерений, полученные в ходе разных циклов мониторинга, подвергаются сравнительному анализу.

2. *Создание картографических материалов, отражающих области с максимальной степенью оседания земной поверхности.* По результатам проведенных измерений выявляются участки, где наблюдаются максимальные оседания земной поверхности относительно всей исследуемой территории. На основе полученных данных составляются карты деформаций.



Рис. 2. Схема алгоритма проведения маркшейдерских работ при обнаружении очагов подземных пожаров с помощью радарной интерферометрии /

Fig. 2. Scheme of the algorithm for conducting surveying operations when detecting underground fires using radar interferometry

3. Составление карт участков повышенных температур земной поверхности. Для целей мониторинга и ликви-

дации подземных пожаров необходимо точное определение аномалий температуры земной поверхности, обусловленных процессами подземного горения угля [14]. Поэтому осуществляется сбор мультиспектральных данных с применением спутниковых технологий. На основе этих данных выявляются участки с наиболее высокими температурами земной поверхности, которые затем наносятся на карты.

4. Сопоставление карт деформаций и температуры земной поверхности. Составляется карта, объединяющая сведения о деформациях и температуре земной поверхности. Затем на основе этой карты выявляются участки, где одновременно наблюдаются повышенные значения температуры и вертикальных оседаний.

После проведения всех вышеупомянутых действий производятся дополнительные наблюдения в горных выработках, находящихся непосредственно в зоне наибольших деформаций земной поверхности. Затем принимаются дополнительные предохранительные меры для предотвращения самовозгорания угля в шахте.

За последние три десятилетия методика InSAR продемонстрировала высокую эффективность в области оценки оседания грунта. Данный метод применяется в различных целях, на различных аналитических уровнях и в разнообразных условиях [15].

Заключение

1. Метод радарной интерферометрии представляет собой эффективный инструмент для исследования участков, потенциально подверженных возникновению подземных пожаров посредством анализа деформаций земной поверхности.

2. Оптимизация алгоритма, предложенного в статье для проведения маркшейдерских работ, позволит значительно усовершенствовать процесс выявления и предотвращения на ранних стадиях возникновения очагов подземных пожаров.

3. Дальнейшее применение радарной интерферометрии для решения маркшейдерских задач по определению оседаний земной поверхности существенно повысит качество получаемых результатов. К тому же активное развитие спутниковых технологий в настоящее время открывает больше возможностей для внедрения метода радарной интерферометрии в решение различных маркшейдерских задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ворсин НА. Подземные пожары и способы их тушения. *Аллея науки*. 2023; 1(76): 345-349. [Vorsin NA. Underground fires and ways of extinguishing them. *Alley of Science*. 2023; 1: 345-349. (In Russ.).]
2. Калайгорода ВВ, Никулин НЮ, Простов СМ. и др. Мониторинг зоны самовозгорания породугольного массива георадиолокационным методом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2022; 3: 95-103. [Kalaygoroda V.V., Nikulin N.Yu., Prostop S.M., et al. Monitoring of the spontaneous combustion zone of the carboniferous massif using the georadiolocation method. *News of higher educational institutions. Mining Magazine*. 2022; 3: 95-103. (In Russ.).] DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-95-103.
3. Тютюкова ВА. Опыт применения дифференциальной радарной интерферометрии для мониторинга оседаний на рудном месторождении. *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых*. 2024; 1: 194-196. [Tyutyukova VA. Experience in the application of differential radar interferometry for monitoring sedimentation in an ore deposit. *Problems of development of hydrocarbon and ore deposits*. 2024; 1: 194-196. (In Russ.).]
4. Macchiarulo V, Milillo P, DeJong JM, et al. Integrated InSAR monitoring and structural assessment of tunnelling-induced building deformations. *Struct Control Health Monit*. 2021; 28(9): 1-26. DOI: 10.1002/stc.2781.
5. Попов СЕ, Замараев РЮ, Миков ЛС. Обнаружение оползней и оползневых зон на бортах карьеров по данным радарной интерферометрии. *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: сб. ст. IX Международной научной конференции*. Красноярск, 2022: 130-134. [Popov SE, Zamaraev RYu, Mikov LS. Detection of landslides and landslide zones on the sides of quarries according to radar interferometry. *Regional problems of remote sensing of the Earth: collection of articles of the IX International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2022: 130-134. (In Russ.).]
6. Бондур ВГ, Чимитдоржиев ТН, Дмитриев АВ и др. Методы радарной интерферометрии и обработки оптических спутниковых изображений для исследования негативных воздействий на окружающую среду (на примере байкальского ЦБК). *Исследование Земли из космоса*.

- 2021; 5: 3-14. [Bondur VG, Chimitdorzhiev TN Dmitriev A.V, et al. The method of radar interferometry and optical satellite image processing for the study of negative impacts on the environment (using the example of the Baikal CSC). *Exploring the Earth from space*. 2021; 5: 3-14. (In Russ.)].
7. Гиниятуллина ОЛ, Гречишкин ПВ, Трошков НЮ. Опыт мониторинга сдвижения поверхности подработанных территорий при ликвидации угольных шахт по данным дистанционного зондирования земли. *Горная промышленность*. 2024; 3: 44-47. [Giniyatullina OL, Grechishkin PV, Troshkov NYu. Experience in monitoring the displacement of the surface of mined areas during the liquidation of coal mines based on remote sensing data. *Mining industry*. 2024; 3: 44-47. (In Russ.)]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-44-47.
8. Cao N, Wang G, Liang Y. Study on the microscopic mechanism of spontaneous combustion and oxidation kinetics of Water-Leached Coal. *Journal of Chemistry*. 2021; 1: 1-15. DOI: 10.1155/2021/5564290.
9. Маадыр-оол ШО. Процесс самовозгорания угля и его особенности. *Научные труды Тувинского государственного университета: сб. ст. ежегодной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов Тувинского государственного университета, посвященной Году культурного наследия народов России*. Кызыл, 2023; 21: 184-187. [Maadyr-ool ShO. The process of spontaneous combustion of coal and its features // *Materials of the annual scientific and practical conference of teachers, staff and graduate students of Tuva State University dedicated to the Year of Cultural Heritage of the Peoples of Russia «Scientific Works of Tuva State University»*. Kyzyl, 2023; 21: 184-187. (In Russ.)].
10. Мамаш ЕА, Пестунов ИА, Потапов ВП. Мониторинг подземных пожаров на основе комплексных данных дистанционного зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): сб. ст. 20-й Международной конференции*. Москва, 2022; 104. [Mamash EA, Pestunov IA, Potapov VP. Monitoring of underground fires based on integrated remote sensing data. *Proceedings of the 20th International Conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space»*. Moscow, 2022; 104. (In Russ.)]. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
11. Миков ЛС, Потапов ВП. Применение радарной интерферометрии для комплексной оценки геомеханических и термодинамических процессов (на примере Кузбасса). *Вестник НЦ ВостНИИ*. 2024; 3: 34-43. [Mikov LS, Potapov VP. Application of radar interferometry for a comprehensive assessment of geomechanical and thermodynamic processes (using the example of Kuzbass). *Bulletin of the Scientific Research Center VostNI*. 2024; 3: 34-43. (In Russ.)]. DOI: 10.25558/VOSTNI.2024.87.44.004.
12. Kim J, Lin SY, Singh RP, et al. Underground burning of Jharia coal mine (India) and associated surface deformation using InSAR data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2021; 103: 1-12.
13. Муродов СД, Чермошентцев АЮ. Методика мониторинга смещений зданий и сооружений по данным космической радиолокационной съемки. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2020; 6(2): 36-40. [Murodov SD, Chermoshentsev AYU. Methodology for monitoring displacement of buildings and structures based on space radar survey data. *Interexpo GEO-Siberia*. 2020; 6; 2:36-40. (In Russ.)].
14. Yuan G, Wang Y, Zhao F, et al. Accuracy assessment and scale effect investigation of UAV thermography for underground coal fire surface temperature monitoring. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2021; 102: 1-17.
15. Raspini F, Caleca F, Soldato MD, et al. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews*. 2022; 235: 1-39. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.10423.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Иван Михайлович Величко –
аспирант, Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», 119049, г. Москва, Российская
Федерация, e-mail: ivan.velichko98@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.06.2025.

Поступила после рецензирования: 19.07.2025.

Принята к публикации: 13.08.2025.

Article info

Received: 14.06.2025.

Revised: 19.07.2025.

Accepted: 13.08.2025.

ABOUT THE AUTHOR

Ivan M. Velichko –
Graduate Student, Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Education “National Research
Technological University “MISIS”, 119049, Moscow, Russian
Federation, e-mail: ivan.velichko98@gmail.com

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

К. А. Воробьев[✉], Е. В. Колодежная

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

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

✉ vorobyev_k@ipkonran.ru

Аннотация: Мусоросжигательные заводы (МСЗ) в настоящее время становятся важным элементом комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) в России. Рассмотрены вопросы обработки и трансформации в окружающей среде продуктов, образующихся при сжигании ТКО. Приведены результаты сравнительного анализа литературных данных о наличии в шлаках и зольных остатках от сжигания ТКО загрязняющих веществ с позиции эколого-гигиенического аспекта их утилизации или хранения. В качестве объекта исследований взяты шлак и летучая зола МСЗ № 3. С целью выявления возможности безопасного использования и депонирования данных отходов определено наличие в шлаках и зольных остатках загрязняющих веществ комплексом минералого-аналитических методов. Сделан однозначный вывод о значительном превышении в летучей золе содержания тяжелых металлов (по отношению к гигиеническим нормативам для почв), показана высокая миграционная способность тяжелых металлов из золы в почвы, воды поверхностных и подземных источников. Сравнение содержаний тяжелых металлов и микроэлементов в водных вытяжках шлаков с ПДК химических веществ в воде водных объектов показало, что по всем основным экоконтролируемым элементам концентрации гораздо ниже ПДК. Из результатов испытаний на выщелачивание изучаемых шлаков следует, что перехода тяжелых металлов из шлаков практически не происходит, значит, шлаки стабильны и могут быть пригодны для рециклинга без каких-либо ограничений.

Ключевые слова: мусоросжигательный завод, остатки от сжигания твердых коммунальных отходов, шлак, летучая зола, водные вытяжки, ПДК, выщелачивание тяжелых металлов, химический состав, полигоны захоронения, класс опасности

Благодарности, признательность: авторы выражают искреннюю благодарность научному руководителю аспиранта – заведующему отделом горной экологии ИПКОН РАН, профессору, доктору технических наук И. В. Шадреновой и ведущему научному сотруднику отдела доктору технических наук О. Е. Горловой за ценные рекомендации при обсуждении результатов исследования.

Для цитирования: Воробьев КА, Колодежная ЕВ. Оценка эколого-гигиенических аспектов утилизации продуктов термической обработки твердых коммунальных отходов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):88-94. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-88-94>.

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL AND HYGIENIC ASPECTS OF THERMAL TREATMENT WASTE DISPOSAL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE

K. A. Vorobyev[✉], E. V. Kolodezhnaya

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

✉ vorobyev_k@ipkonran.ru

Abstract: Waste incineration plants (WIPs) are currently becoming an important element of the integrated municipal solid waste (MSW) management system in Russia. This article examines the issues of processing and transformation of products formed during MSW incineration in the environment. The results of a comparative analysis of literature data on the presence of pollutants in slag and ash residues from MSW incineration are presented, from the perspective of the environmental and hygienic aspects of their disposal

or storage. Slag and fly ash from WIP No. 3 were taken as the object of research. In order to determine the possibility of safe use and disposal of these wastes, the presence of pollutants in slag and ash residues was determined using a complex of mineralogical and analytical methods. An unambiguous conclusion was drawn about a significant excess of heavy metal content in fly ash (in relation to hygienic standards for soils), and a high migration capacity of heavy metals from ash to soils and into surface and groundwater sources was demonstrated. A comparison of the contents of heavy metals and trace elements in aqueous extracts of slag with the maximum permissible concentrations (MPCs) of chemical substances in water bodies showed that, for all major environmentally controlled elements, the concentrations are much lower than the MPCs. The results of leaching tests on the studied slag indicate that the transfer of heavy metals from the slag is practically non-existent, which means that the slag is stable and may be suitable for recycling without any restrictions.

Keywords: waste incineration plant, MSW incineration residues, slag, fly ash, aqueous extracts, MPC, heavy metal leaching, chemical composition, landfills, hazard class

Acknowledgments: The authors express their sincere gratitude to the scientific supervisor of the postgraduate student, Head of the Department of Mining Ecology at IPKON RAS, D. Sc. (Eng.), Prof. Irina V. Shadrinova, and to the Leading Researcher of the Department, D. Sc. (Eng.) Olga E. Gorlova, for their valuable advice and guidance during the preparation of this article.

For citation: Vorobyev KA, Kolodezhnaya EV. Assessment of the environmental and hygienic aspects of thermal treatment waste disposal from municipal solid waste. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):88-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-88-94>.

Введение

Проводимая в настоящее время комплексная реформа системы обращения с отходами уже приносит некоторые положительные результаты, в том числе она благоприятно отразилась на реорганизации и улучшении инфраструктуры действующих полигонов ТКО. Мусоросжигательные заводы становятся важным элементом новой системы, так как они позволяют сократить объем отходов, уменьшить риск загрязнения окружающей среды, значительно снизить необходимость в мусоровозах и повысить эффективность использования ресурсов. На сжигание сегодня отправляется порядка 6 % образующихся отходов, но перспективность данного направления утилизации становится очевидной. Исключительным достоинством такого подхода является значительное (на 90 %) уменьшение объема и веса (на 70 %) твердых отходов, что является приоритетной стратегией обеспечения экологической безопасности и поддержания чистоты городской среды.

В мире сжигается в среднем более 10 % образующихся коммунальных отходов. Во многих европейских странах, таких как Швеция, Франция, Нидерланды и Дания, этот показатель превышает 50 % [1]. Всего в развитых странах ежегодно образуется свыше 550 млн т муниципальных отходов. Наиболее остро проблема переработки шлаков, образующихся при сжигании мусора, стоит в Японии, где сжигается свыше 70 % муниципальных отходов. По данным Агентства по защите окружающей среды США (US EPA, 2000 г.), на 102 мусоросжигательных заводах было переработано 35 млн т (39 % от общего объема), что привело к образованию 8,75 млн т остатков сжигания. В Германии в отрасли утилизации обрабатывается более 20 % всех твердых отходов, в том числе и муниципальных [2]. Начиная с 1990-х годов количество отходов, размещаемых на полигонах захоронения, с каждым годом сокращается, а подвергаемых переработке – увеличивается. Так, ежегодно сжигается 9–11 млн т отходов [3, 4].

Процесс сжигания ТКО не является безотходным, в результате термического воздействия происходит трансформация вещества с образованием остатков сжигания: шлака и золы, суммарное количество которых составляет 25–30 % от исходной массы ТКО. Зола обычно составляет около 2–6 % от исходной массы сжигаемых отходов [5, 6].

При этом способы обработки и трансформация твердых остатков сжигания в окружающей среде изучены на сегодняшний момент не в полной мере. В нескольких исследованиях были получены или обобщены данные о химическом составе шлака и летучей золы [7, 8]. Отмечается, что основными элементами шлака являются Si (91–308 г/кг), Al (22–73 г/кг), Fe (4–150 г/кг), Ca (0,4–123 г/кг), Mg (0,4–26 г/кг), а также S (1–5 г/кг), P (1–7 г/кг) и Cl (0,5–4,5 г/кг). Особое внимание уделяется содержанию в остатках сжигания As (0,12–189 мг/кг), Cd (0,3–70,5 мг/кг), Cr (23–3170 мг/кг), Cu (190–8240 мг/кг), Hg (0,02–7,75 мг/кг), Ni (7–4280 мг/кг), Pb (87–13700 мг/кг) из-за их токсичности [9, 10].

В золе-уносе распространены такие элементы, как Cl (45–380 г/кг), Ca (46–361 г/кг), Si (36–190 г/кг), Pb (254–27000 мг/кг), Zn (4308–41000 мг/кг). В золе обычно присутствуют следовые количества высокотоксичных органических соединений: полициклических углеводородов (ПАУ), хлорбензолов (ХБ), полихлорированных бифенилов (ПХБ), полихлорированных дифенза-*p*-диоксинов (ПХДД) и фуранов (ПХДФ).

Анализ литературных данных показал, что количество опасных химических соединений в шлаке намного ниже, чем в летучей золе от сжигания ТКО. Поэтому шлак, как правило, относится в IV классу и не включается в категорию опасных отходов. Зола-унос имеет III класс опасности и обычно классифицируется как опасные отходы из-за присутствия токсичных тяжелых металлов и диоксинов. Отметим, что содержания отдельных элементов и тяжелых металлов в золошлаковых отходах, диапазоны содержаний, приводимые в различных зарубежных и отечественных источниках, значительно разнятся. Поэтому нет однозначного вывода об опасности или неопасности таких отходов. В отношении зольных остатков от сжигания мусора практически всегда делается вывод о том, что они относятся к опасным отходам и обычное полигонное захоронение или вторичное использование неприемлемы для данного материала без предварительной обработки.

Химическое состояние, в которое переходят металлы в процессе сжигания отходов, важно, поскольку от этого зависит последующий переход их в окружающую среду в местах конечного захоронения (почвы, грунтовые и поверхностные воды) или вторичного использования таких материалов. По-



Шлак / slag



Зола / ash



Зола / ash

Рис. 1. Фотографии шлака и золы / Fig. 1. Photographs of slag and ash

ступление ионов тяжелых металлов в окружающую среду связано с антропогенным влиянием на биосферу, поскольку многие соединения тяжелых металлов обладают способностью растворяться, диссоциировать, перераспределяться и мигрировать в объектах окружающей среды [11].

Цель исследования: процессы выщелачивания загрязняющих веществ из остатков сжигания твердых отходов с целью минимизации их негативного воздействия на геосферные оболочки в результате миграции в природные среды (почвы, поверхностные и грунтовые воды) подвижных форм тяжелых металлов (главным образом, свинца, кадмия, цинка, меди, хрома).

Для достижения поставленной цели были определены химический состав и физико-механические показатели шлаков и летучей золы от сжигания ТКО комплексом минералого-аналитических методов, а также установлены закономерности выщелачивания загрязняющих веществ из остатков от сжигания ТКО с позиции эколого-гигиенического аспекта их утилизации или хранения.

Объектами исследования послужили пробы шлака и летучей золы Московского мусоросжигательного завода № 3, г. Москва. Отбор и подготовка представительных технологических проб проводились в соответствии с общепринятыми методиками.

Макроскопически шлак мусоросжигательных установок представляет собой кусковой материал серого цвета. Шлаковая масса, представленная вновь образованными при сжигании фазами, имеет пористую слабосцементированную структуру с максимальной крупностью агрегатов до 40 мм. Установлено наличие в шлаке небольшого количества металлического скрапа. Летучая зола представляет собой тонкодисперсный порошок светло-серого цвета, склонна к слеживанию и формированию комков.

Методы исследований

Вещественный состав и технологические свойства шлаков и золы-уноса от сжигания отходов формируются под влиянием большого количества факторов техногенного характера, что приводит к многообразию и непостоянству их состава и свойств, а следовательно, делает их трудными объектами для изучения.

Для проведения экспериментальных работ нами использовано уникальное оборудование Центра коллективного пользования ИПКОН РАН и ЗАО «Урал Омега». Отдельные образцы шлаков были исследованы в ВИМС и ИГЕМ РАН.

Техногенные материалы, образующиеся при высокотемпературных процессах, шлаки и золы мусоросжигательных

установок, представляют собой композиционные материалы и в составе содержат разнородные компоненты, содержание которых варьируется в широком диапазоне значений. В связи с этим определение химического состава исходных материалов проводилось рентгено-флуоресцентными методами анализа.

Шлак был отобран непосредственно из-под решетки теплоагрегата. Зола-унос сухого удаления была отобрана на выгрузке из тканевых фильтров систем газоочистки. Пробы подвергались усреднению, перемешиванию, квартованию и измельчению в соответствии с принятыми методиками. В процессе подготовки проб шлака к химическому анализу из них были удалены недробимые частицы металлического скрапа.

Внешний вид образцов шлака и золы-уноса представлен на рисунке 1.

Химический состав определен рентгено-флуоресцентным методом на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific.

Гранулометрический состав шлака определен методом ситового анализа по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Дисперсный состав золы определялся на лазерном анализаторе размера частиц Mastersizer 2000 Malvern Instruments (ГОСТ Р 8.777 2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения»).

Для оценки выщелачивания микроэлементов были проведены статические серийные тесты по методике, изложенной в работе [12], позволяющие оценить переход экоконтролируемых компонентов из остатков от сжигания ТКО в жидкую фазу. Для этого пробы шлаков и золы были выдержаны при комнатной температуре в течение нескольких дней для испарения лишней влаги. Шлак был просеян через сито с размером ячейки 10 мм. Материал крупнее был удален. Пробы навеской 50 г шлака помещались в стеклянную емкость, и к ним добавлялось 500 мл дистиллированной воды (рН 5,8). Смесь устанавливалась на магнитную мешалку для слабого перемешивания в течение 8 ч, а затем отстаивалась в спокойном состоянии в течение 12 ч. Жидкость отделялась от пробы и отфильтровывалась через фильтр бумаги два раза, определялся рН. Через 6 ч отфильтрованная жидкость анализировалась на микроэлементный состав.

Микроэлементный состав водных вытяжек, включающий Li, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Cd, Ba, W, Re, Pb и U, был определен методом масс-спектрометрии с индук-

тивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе SUPEC700 фирмы FPI. Концентрации макроэлементов Ca, Mg, K и Na были измерены методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP OES) на приборе EXPEC 6500 фирмы FPI.

Результаты исследований

Зерновой состав шлаков и зол от сжигания ТКО имеет большое значение для различных аспектов обращения с отходами. Результаты ситового анализа шлаков представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1
Гранулометрический состав шлака, % /
Granulometric composition of slag, %

Остатки на ситах / Oversize fraction	Размер частиц / Oversize fraction retained								
	20 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм	0,63 мм	0,315 мм	0,16 мм	Дно / Pan
Частные / Individual Sieve Residues	2,5	41,3	41,5	7,5	3,3	0,9	0,8	0,7	1,5
Полные / Total Sieve Residue	2,5	43,8	85,3	92,8	96,1	97,0	97,8	98,5	100

Шлак имеет крупнозернистый состав с преобладанием частиц размером от 5 до 20 мм, пылевые классы практически отсутствуют. Это способствует хорошей водопроницаемости шлака при хранении и направленной обработке реагентами шлакового массива.

Результаты определения гранулометрического состава золы, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о ее тонкодисперсном характере: 80 % частиц имеют размер менее 18,9 мкм.

Таблица 2 / Table 2
Показатели гранулометрического состава золы /
Granulometric composition parameters of ash

Размер частиц D, мкм / Particle size D, μm	Количество материала меньше размера частиц D, % / Percentage of material finer than size D, %
3,6	10
4,8	20
8,7	50
18,9	80
32,9	90
60,0	98

Анализ гранулометрического состава позволяет предположить возможность использования золы в качестве вяжущего и тонкого наполнителя.

Анализ распределения частиц по размерам показывает, что средний медианный диаметр частиц шлака составляет 3,25 мм, зольного остатка – 8,7 мкм.

Результаты изучения физических и химических свойств остатков от сжигания ТКО приведены в таблице 3.

Как следует из представленных данных, летучая зола по сравнению со шлаком имеет меньшую плотность, меньший размер частиц, большую удельную поверхность и большую щелочность. Уровень pH золы-уноса и твердых остатков, образующихся при обработке дымовых газов (АРС), высок и

обычно превышает $11 \div 12$ ед. из-за избытка извести, вводимой для очистки газов.

Таблица 3 / Table 3
Физические и химические свойства остатков от сжигания ТКО /
Physical and chemical properties of municipal solid waste (MSW)
incineration residues

Параметр / Parameter	Шлак / Slag	Летучая зола / Fly ash
Истинная плотность, кг/м³ / True density, kg/m³	2,1–2,3	2,7–3,2
Насыпная плотность, кг/м³ / Bulk density, kg/m³	0,9–1,1	0,6–0,7
Влажность, % / Moisture content, %	0,24	1,96
Средний медианный диаметр, мкм / Median diameter, μm	3 250	8,7
Максимальный размер частиц, мкм / Maximum particle size, μm	25 000	60
Удельная поверхность, м²/кг / Specific surface area, m²/kg	-	280,0
pH	8,9	11,4
Модуль основности / Basicity modulus	0,48	6,2
Модуль активности / Activity modulus	0,18	0,38

Для оценки использования шлаков термической утилизации ТКО в качестве вяжущего в составе бетонов применяется модуль основности ($\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), который определяет количество кальция и магния в фазах, способных к гидратации, но не в карбонатах, и модуль активности ($\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$), дающие модулю основности и модулю активности представление о соотношении отдельных минералов и позволяющие оценить способность шлака к гидратации [13–15].

По результатам химического анализа (табл. 4) проб исследуемый шлак относится к кислым с модулем основности 0,48 и модулем активности 0,18, что указывает на возможно низкую гидратационную активность.

Таблица 4 / Table 4
Химический состав исследуемых шлака и золы уноса /
Chemical composition of the analyzed slag and fly ash

Компонент / Element	Массовая доля элементов и соединений, % / Mass fraction of elements and their compounds, %	
	Шлак / Slag	Зола-унос / Fly ash
SiO_2	36,4	4,63
Al_2O_3	6,54	1,76
CaO	19,5	39,07
MnO	0,10	0,73
MgO	0,97	0,53
TiO_2	0,47	0,34
K_2O	0,95	4,96
P_2O_5	0,40	0,20
SO_3	1,03	3,50
ZnO	0,11	0,66
$\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{FeO})$	5,22	1,58
Na_2O	2,25	3,24
PbO	-	0,13
Cl	0,43	16,64
As_2O_3	-	0,16

Результаты элементного анализа водных вытяжек шлаков сжигания ТКО представляют собой ценный материал для

изучения геохимических процессов, протекающих при термической обработке отходов, и их влияния на окружающую среду. Оценка возможного неблагоприятного влияния отхода на окружающую среду проводится путем сопоставления уровня фактического соединения компонентов отходов в водном и буферном экстрактах с их ПДК для воды водоемов (ПДК_в) и содержания токсикантов в мг/кг в отходах с их ПДК в почве (ПДК_п).

Тест на выщелачивание загрязняющих веществ был проведен на пробах шлаков, поскольку из результатов химического анализа летучей золы следовало, что содержание экоконтролируемых тяжелых металлов: цинка, свинца, мышьяка – превышает ПДК химических веществ в почве в соответствии с гигиеническими нормативами (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Содержание некоторых экоконтролируемых элементов в летучей золе в сравнении с ПДК_п /
Content of selected environmentally controlled elements in fly ash compared to MAC_s

Соединение / Compound	Массовая доля в золе, % / Mass fraction in ash, %	Элемент / Element	Содержание элемента, мг/кг / Element content, mg/kg	ПДК _п , мг/кг / MAC _s , mg/kg
MnO	0,73	Mn	5 621	1 500
ZnO	0,66	Zn	5 280	23,0
PbO	0,13	Pb	1 200	32,0
As ₂ O ₃	0,16	As	1 210	2,0

Наиболее адекватно прогнозировать потенциальную опасность промышленного отхода для окружающей среды позволяет буферная вытяжка, поскольку она наиболее приближенно к реальным условиям моделирует кислотность почвенного раствора и кислотных дождей, поэтому проводили процедуру выщелачивания в дистиллированной воде

и в ацетатно-аммонийном буферном растворе. Элементный состав вытяжек водных и в ацетатно-аммонийном буферном растворе по микроэлементам в размерности ppb (миллиардная доля, в системе единиц СИ означает множитель 10⁻⁹) приведен на рисунке 2.

Для шлаков МСЗ характерно статистически значимое повышение концентраций Li, B, Cr, Fe, Rb, Sr, Ba, W и Re. Данные элементы связаны с определенными компонентами ТКО, характерными для городской среды мегаполиса, также включающими промышленные и бытовые отходы.

В буферных вытяжках содержания микроэлементов выше по сравнению с водными вытяжками ввиду слабосильной среды ацетатно-аммонийного буферного раствора (pH 4,8). Сравнение содержания элементов в водных вытяжках шлака с ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования показывает, что по основным тяжелым металлам содержание гораздо ниже ПДК_в. Превышение ПДК_в наблюдается только по литию и по вольфраму.

Приведенные данные по водным и буферным вытяжкам свидетельствуют, что перехода тяжелых металлов из шлаков практически не происходит, и подтверждают исключение возможности миграции вредных веществ из шлаков или продуктов их переработки в окружающую среду.

Элементный состав вытяжек шлаков, определенный методами количественного анализа, позволяет установить класс опасности отходов расчетным методом по ориентировочному водно-миграционному показателю (ОВМП) в соответствии с СП 2.1.7.1386-03 «Определение класса опасности токсичных отходов производства и потребления». Этот показатель используется для предварительной оценки водно-миграционной опасности отхода и характеризует возможное отрицательное влияние отхода на условия жизни и здоровье человека в результате миграции его компонентов в грунтовые и поверхностные воды.

По результатам химического анализа водного экстракта

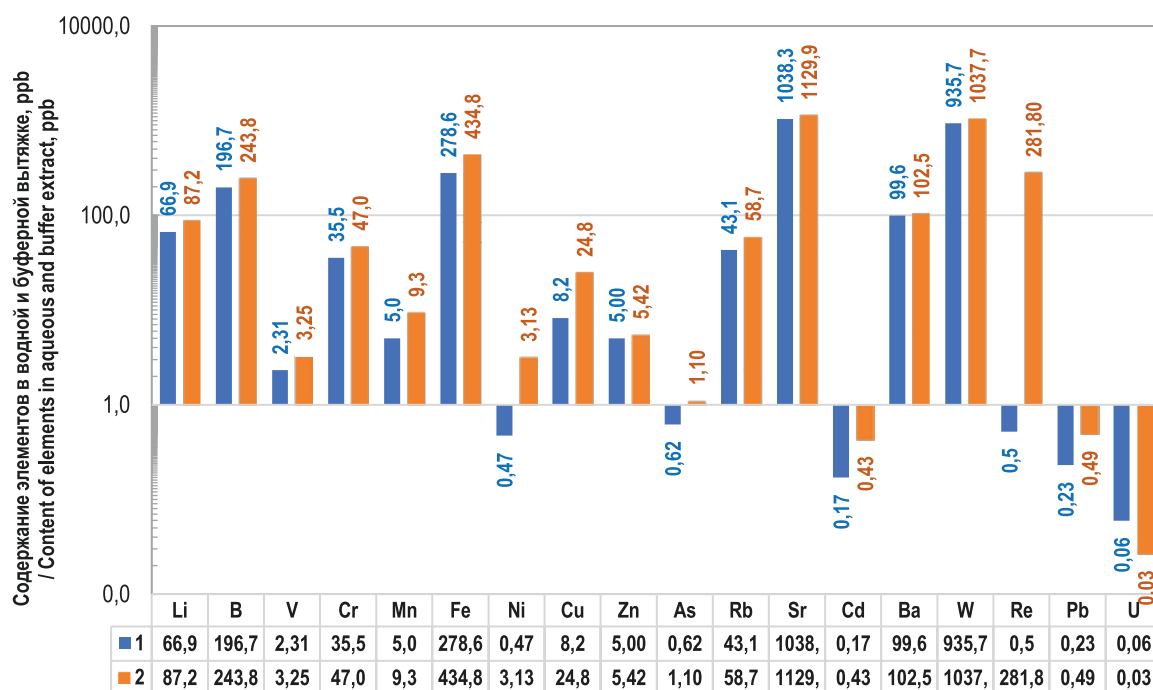


Рис. 2. Элементный состав водной (1) и буферной (2) вытяжки шлака по микроэлементам /
 Fig. 2. Elemental composition of aqueous (1) and buffer (2) extract of slag with respect to trace elements

производился расчет ОВМП_в, по результатам анализа буферного экстракта отхода – расчет ОВМП_б по формулам:

$$\text{ОВМП}_{\text{в(б)}} = \sum \frac{C_i^{\text{в(б)}}}{\text{ПДК}_i^{\text{в(б)}}},$$

где $C_i^{\text{в}}, C_i^{\text{б}}$ – фактические концентрации i -того компонента в водном и буферном экстрактах соответственно, мг/л;

$\text{ПДК}_i^{\text{в}}$ – предельно допустимая концентрация содержания данного компонента в воде водоемов, мг/л.

По результатам расчета для шлака ОВМП_в = 22,38, класс опасности – III. Таким образом, шлак московского МСЗ по ориентировочному водно-миграционному показателю является умеренно опасным.

Заключение

1. Анализ литературных данных о наличии в шлаках и зольных остатках от сжигания ТКО загрязняющих веществ и их способности мигрировать в соприкасающиеся с отходами среды, с позиции эколого-гигиенического аспекта их утилизации или хранения показал, что в отношении летучей золы большинством исследователей установлена высокая миграционная способность тяжелых металлов из золы в почвы и воды поверхностных и подземных источников. Зольные остатки классифицируются как опасные отходы, обычное полигонное захоронение которых или вторичное использование чаще всего неприемлемо. В отношении шлаков такого однозначного вывода об их опасности или неопасности не делается, потому что данные, приводимые в разных источниках, существенно разнятся.

2. Для каждого изучаемого отхода, наряду с достоверными данными о его качественно-количественных характеристиках, необходимо проведение тестов по выщелачиванию для оценки потенциального экологического риска, создаваемого экотоксикантами. Наличие ингредиентов, например тяжелых металлов, в составе отхода лишь косвенно свидетельствует о его токсичности и не в полной мере характеризует миграционную активность токсичных элементов, как и возможность неблагоприятного воздействия продуктов переработки отходов и на окружающую среду.

3. Были получены экстракты выщелачивания (водные и ацетатно-аммонийные буферные вытяжки) проб шлака и проанализированы на содержание в них микроэлементов современными аналитическими методами. Сравнение содержаний тяжелых металлов и микроэлементов в водных вытяжках шлака МСЗ № 3 с ПДК химических веществ в воде водных объектов показало, что по всем основным экоконтролируемым элементам концентрации гораздо ниже ПДК_в. Некоторое превышение ПДК наблюдается только по литию и вольфраму.

4. Из результатов испытаний на выщелачивание изучаемых шлаков следует, что перехода тяжелых металлов из шлаков практически не происходит, значит, шлаки стабильны и пригодны для повторного использования.

5. Дальнейшая работа будет направлена на проработку технологических решений и эколого-социальное обоснование соутилизации отходов от сжигания ТКО и секвестрации углекислого газа методом минеральной карбонизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алексашина ВВ. Экология города. Мусоросжигательные заводы. *Academia. Архитектура и строительство*. 2014; 4: 10. [Aleksashina VV. The ecology of the city. waste incineration plants. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 4: 10. (In Russ.)].
2. Щерба ВА, Баранова КР, Абрамова ЕА и др. Особенности правового регулирования и обращения с твердыми коммунальными отходами в России и Германии. *Отходы и ресурсы*. 2023; 10 (2): 1-12. [Shcherba VA, Baranova KR, Abramova EA, et al. Features of legal regulation and management of municipal solid waste in Russia and Germany. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023; 10 (2): 1-12. (In Russ.)]. DOI: 10.15862/12NZOR223.
3. Costa G, Baciocchi R, Poletti A, et al. Current status and perspectives of accelerated carbonation processes on municipal waste combustion residues. *Environ Monit Assess*. 2017; 135: 55-75.
4. Воробьев КА, Щерба ВА. Особенности захоронения CO₂ в техногенных литосферных реакторах как фактор сокращения количества его антропогенных выбросов. *География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции (к 225-летию Герценовского университета): В 2 томах*. Санкт-Петербург, 2022; II: 31-35 [Vorobyev KA, Shcherba VA. Features of CO₂ disposal in technogenic lithospheric reactors as a factor in reducing its anthropogenic emissions. *Geography: Development of Science and Education: Collection of Articles Based on the Materials of the Annual International Scientific and Practical Conference (on the 225th Anniversary of Herzen University)*. In 2 volumes. St. Petersburg, 2022; II: 31-35. (In Russ.)].
5. Hongwei Luo, Ying Cheng, Dongqin He, et al. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Science of The Total Environment*. 2019; 668: 90-103. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.004.
6. Колодежная ЕВ, Шадрунова ИВ, Горлова ОЕ, et al. Вещественный состав остатков сжигания твердых коммунальных отходов и оценка их потенциала минерального связывания диоксида углерода. *Обогащение руд*. 2025; 1: 42-49. [Kolodezhnaya EV, Shadrunkova IV, Gorlova OE, et al. Material composition of solid municipal waste incineration residues and assessment of their potential for mineral carbon dioxide binding. *Ore Processing*. 2025; 1: 42-49. (In Russ.)]. DOI: 10.17580/or.2025.01.07.
7. Lindberg D, Molin C, Hupa M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review. *Waste Manag*. 2015; 37: 82-94. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.12.009.
8. Taurino R, Karamanova E, Barbieri L, et al. New fired bricks based on municipal solid waste incinerator bottom ash. *Waste Manag. Res*. 2017; 35 (10): 1055-1063. DOI: 10.1177/0734242X17721343.
9. Ko MS, Chen YL, Wei PS. Recycling of municipal solid waste incinerator fly ash by using hydrocyclone separation. *Waste Manag*. 2013; 33 (3): 615-620. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.10.009.
10. Chen D, Zhang Y, Xu Y, et al. Municipal solid waste incineration residues recycled for typical construction materials-a review. *RSC Adv*. 2022; 12 (10): 6279-6291. DOI: 10.1039/d1ra08050d.
11. Гонопольский АМ, Дыган ММ, Тимофеева АА. Некоторые физико-химические свойства золошлаковых отходов мусоросжигательных заводов. *Экология и промышленность России*. 2008; 7: 36-39. [Gonopolsky AM, Dugan MM, Timofeeva AA. Some physical and chemical properties of ash and slag waste from waste incineration plants. *Ecology and Industry of Russia*. 2008; 7: 36-39. (In Russ.)].

12. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 Т 16.1:2.3:3.8-04. Токсикологические методы анализа. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению интенсивности бактериальной билюминесценции тест системой «Эколюм». Москва, 2004: 22. [PND F T 14.1:2:3:4.11-04 Т 16.1:2.3:3.8-04 Toxicological methods of analysis. Method for determining the integral toxicity of surface water, including marine, groundwater, drinking water, wastewater, aqueous extracts of soils, waste, and sewage sludge, based on changes in the intensity of bacterial bioluminescence using the Ecolum test system. Moscow, 2004: 22. (In Russ.)].

13. Zhang H, He PJ, Shao LM et al. Leaching behavior of heavy metals from municipal solid waste incineration bottom ash and its geochemical modeling. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2008; 10: 7-13. DOI: 10.1007/s10163-007-0191-z.

14. Luo H, Cheng Y, He D, Yang EH. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Sci Total Environ.* 2019; 668: 90-103. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.004.

15. Mehdizadeh H, Jia X, Mo KH, et al. Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the accelerated carbonation of cement pastes. *Environmental Pollution.* 2021; 280: 116914. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116914.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Кирилл Александрович Воробьев – аспирант, инженер отдела горной экологии ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>, e-mail: vorobyev_k@ipkonran.ru



Екатерина Владимировна Колодежная – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0252-4479>, e-mail: kev@uralomega.ru

ABOUT THE AUTHORS

Kirill A. Vorobyev – Post-graduate Student, Engineer of the Department of Mining Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>, e-mail: vorobyev_k@ipkonran.ru

Ekaterina V. Kolodezhnaya – Cand. Sci. (Eng.), associate professor, Leading Researcher of the Department of Mining Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: kev@uralomega.ru

Критерии авторства / Contribution:

К. А. Воробьев – формулирование идеи и задач исследования, отбор проб шлаков и золы на мусоросжигательных заводах, разработка методики и проведение экспериментов, выполнение работы по систематизации теоретического и экспериментального материала, написание текста статьи (80 % авторского участия). Е. В. Колодежная – работы по систематизации материала, разработка метода исследования, проведение экспериментов, обработка результатов, написание текста статьи (20 % авторского участия) / К. А. Vorobyev – formulation of the idea and formulation of the research task, sampling of slag and ash at incinerators, development of methods and experiments, carrying out work on the systematization of theoretical and experimental material, writing the text of the article (80 % authorship contributions); Е. V. Kolodezhnaya – work systematization of the material, development of the research method, conducting experiments, processing results, writing the text of the article (20 % authorship contributions).

Конфликт интересов / Conflict of interest:

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.05.2025.

Поступила после рецензирования: 01.06.2025.

Принята к публикации: 07.06.2025.

Article info

Received: 05.05.2025.

Revised: 01.06.2025.

Accepted: 07.06.2025.

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ НА РАЗРЕЗАХ, РАБОТАЮЩИХ В МЕТАНОВОЙ ЗОНЕ

И. А. Архипов✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

г. Москва, Российская Федерация

✉ *condr-95@mail.ru*

Аннотация: Почти половина разрезов России добывают уголь в метановой зоне. Это актуализирует исследования в области контроля концентрации метана в рабочей зоне карьера, а также в санитарной зоне. На разрезах присутствуют точечные, линейные и площадные источники метана. Ключевыми параметрами, влияющими на распространение метана, являются условия местности, форма разреза и направление воздушного потока. В статье оценены возможные концентрации метана для среднестатистического разреза, работающего в метановой зоне при направлении воздушного потока вдоль длины разреза и перпендикулярно ему. В качестве источников метана были рассмотрены буровзрывные скважины, обнажение угля и вмещающих пород, а также транспортируемые потоки полезного ископаемого. Выявлено, что на границе санитарной зоны превышение предельно допустимой концентрации метана не ожидается. Определено, что вентиляционные установки могут обеспечить необходимое количество воздуха для разбавления метана. В связи с этим упор при выборе мер по интенсификации массообмена был сделан на геометрические параметры разреза, а также мощность и энергозатратность установок. Результаты исследований могут быть полезными при определении эмиссии парниковых газов и при разработке мероприятий по охране здоровья работников угольных разрезов.

Ключевые слова: концентрация метана, микроклимат разреза, рабочая зона, санитарная зона, искусственная вентиляция карьера, направление воздушного потока, рабочие места, предельно допустимая концентрация метана

Благодарности, признательность, финансирование: автор выражает благодарность Константину Сергеевичу Коликову, д-ру техн. наук, заведующему кафедрой БЭГП НИТУ «МИСиС», за научное руководство.

Для цитирования: Архипов ИА. Оценка концентрации метана при добыче угля на разрезах, работающих в метановой зоне. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):95-102. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-95-102>.

ESTIMATION OF METHANE CONCENTRATION DURING COAL MINING AT COAL MINES OPERATING IN THE METHANE ZONE

I. A. Arhipov✉

National university of science and technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ *condr-95@mail.ru*

Abstract: Almost half of Russian surface mines produce coal in the methane zone. This actualizes research in the field of methane concentration control in the working zone of the open pit, as well as in the sanitary zone. There are point, linear, and area sources of methane at surface mines. The key parameters affecting methane distribution are terrain conditions, shape of the cut and airflow direction. Possible methane concentrations were estimated for an average cut operating in a methane zone with airflow direction along the length of the cut and perpendicular to it. Drilling and blasting wells, coal and host rock outcrops, and transported mineral flows were considered as sources of methane. It was revealed that at the boundary of the sanitary zone methane maximum permissible concentration exceedance is not expected. It has been determined that ventilation units provide the necessary amount of air to dilute the methane. In this regard, the emphasis when choosing measures to intensify mass transfer was placed on the geometric parameters of the section, as well as on the power and energy consumption of installations.

Keywords: methane concentration, open-pit microclimate, working area, sanitary area, artificial ventilation of the quarry, air flow direction, workplaces, maximum permissible concentration of methane

Acknowledgments, funding, financial Support: The author expresses gratitude to Konstantin Sergeevich Kolikov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of SEMI of the NUST "MISIS" for his scientific supervision.

For citation: Arhipov IA. Estimation of methane concentration during coal mining at coal mines operating in the methane zone. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):95-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-95-102>.

Введение

Метан проявляется при ведении открытых горных работ уже на глубинах 50–150 м в смеси с азотом [1]. Глубоких карьеров (более 100 м) в отрасли насчитывается около 50, что составляет 46,7 % от их общего количества в стране [2]. Существенная часть разрезов разрабатывается в метаноопасной зоне.

На текущий момент проблема обеспечения экологической безопасности добычи угля открытым способом включает в себя следующие аспекты: разработку мероприятий по повышению экологической и пожарной безопасности разрезов, работающих в метановой зоне; снижение возможности превышения предельно допустимой концентрации метана в воздухе рабочей зоны [3–5].

Распространение метана зависит от интенсивности газовыделения, глубины разреза, соотношения глубины разреза к его ширине и доминирующего воздушного потока [6]. Если направление ведения горных работ и направление воздушного потока совпадают, то большая часть метана рассеивается в атмосферу и на большее расстояние. В обратном случае возможно формирование локального превышения предельно допустимой концентрации на рабочих местах. Содержание метана в атмосфере разреза может негативно повлиять на экологию и здоровье рабочего персонала. Кроме того, метан является пожароопасным газом.

Цель исследования: разработать модель эмиссии метана при добыче угля открытым способом и решить аналитическую задачу газовой выделения на разрезе.

Методика исследований

Газовыделение бывает от точечных, линейных и распределенных по площади источников. При этом оно может быть стационарным и нестационарным в зависимости от характера работы источника. Для начала необходимо определить содержание метана в объеме воздушного потока, проходящего через разрез.

Смоделируем ситуацию для условий доминирующего направления ветра в районе расположения разреза, как это показано на рисунке 1.

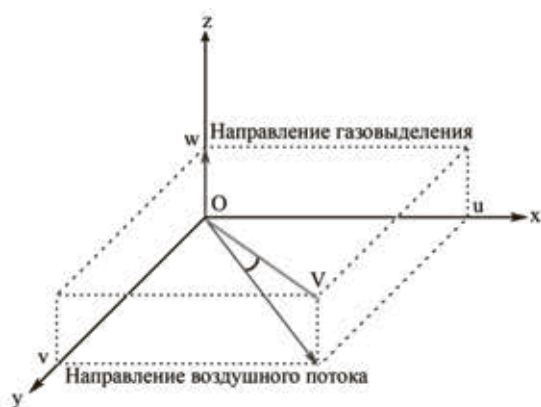


Рис. 1. Схема направления воздушного потока: OV – направление и скорость распространения метана на разрезе; w – проекция скорости воздушного потока на ось Oz; v – проекция скорости воздушного потока на ось Oy; u – проекция скорости воздушного потока на ось Ox; V – вектор скорости воздушного потока /

Fig. 1. Diagram of air flow direction: OV – direction and speed of methane propagation in the section; w – projection of air flow velocity on the Oz axis; v – projection of air flow velocity on the Oy axis; u – projection of air flow velocity on the Ox axis; V – air flow velocity

Представим, что OV – это направление и скорость распространения метана на разрезе, которое доминирует большую часть времени при производстве работ. Тогда w – это проекция его скорости воздушного потока на ось Oz, v – это проекция скорости воздушного потока на ось Oy, а u – это проекция скорости воздушного потока на ось Ox. V – это вектор скорости воздушного потока. Центр координатной оси O соответствует местоположению источника выделения метана.

Эмитируемый метан вступает в диффузионное взаимодействие с воздушным потоком. Таким образом, движение эмитируемого метана определяется диффузионным потоком количества вещества, переносимого диффузией в единицу времени через площадь рабочей зоны разреза. Диффузионные потоки движутся по молекулярному или турбулентному режиму и определяются по формулам для конвективного или турбулентного диффузионных потоков (J , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) соответственно:

$$J_M = -D_M \text{grad} C \quad (1)$$

или

$$J_T = -D_T \text{grad} C, \quad (2)$$

где D_M , D_T – коэффициенты конвективной и турбулентной диффузии; c – концентрация газа, %.

Тогда интенсивность диффузии характеризуется конвекцией по формуле

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Ox} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{Oy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{Oz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

где t – время, мин.;

$D_{Ox} = D_{Mx} + D_{Tx}$; $D_{Oy} = D_{My} + D_{Ty}$; $D_{Oz} = D_{Mz} + D_{Tz}$ – компоненты суммы коэффициентов D_M , D_T по осям координат.

С учетом механизма распространения метана в рабочей зоне карьера в случае конвективного массопереноса (рис. 1) содержание метана ($\text{мг}/\text{м}^3$) можно определить на оси OV по формулам, предложенным В. С. Никитиным [7] для точечного и линейного источников непрерывной эмиссии метана соответственно:

$$C_{CH_4} = \frac{kQ}{x^2 \varphi^2 u_i} \quad (4)$$

$$C_{CH_4} = \frac{kQ}{x \varphi u_i L} \quad (5)$$

где u_i – скорость воздушного потока преобладания аэродинамических сил над термическими, принимается равной 1 м/с;

L – длина линейного источника в направлении, перпендикулярном воздушному потоку, м;

Q – эмиссия метана, мг/с;

k – безразмерный коэффициент, зависящий от схемы проветривания разреза и расположения источника метановыделения, определяемый по таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Значения коэффициента k [6] / Values of the coefficient k [6]

Тип источника метана	Место расположения источника метана	Схема проветривания разреза	
		Прямоточная	Рециркуляционная
Точечный	На поверхности уступа	5,7	5,7
	Над поверхностью уступа	3,0	3,6
Линейный	На поверхности уступа	2,7	3,0
	Над поверхностью уступа	1,3	1,5

φ – угол раскрытия газового факела, определяемый по формуле

$$\varphi = k' \frac{u}{u_i} + b', \quad (6)$$

где k' – безразмерный коэффициент, равный тангенсу угла наклона прямой V (табл. 2);

b' – безразмерный коэффициент, характеризующий турбулентность атмосферы (табл. 2);

u_i – скорость воздушного потока у источника, м/мин.

Таблица 2 / Table 2

Значения коэффициентов k' и b' / Values of coefficients k' and b'

Схема проветривания разреза	Место расположения источника метана	k'	b'
Прямоточная	На поверхности уступа	0,045	0,22
	Над поверхностью уступа	0,05	0,05
Рециркуляционная	На поверхности уступа	0,122	0,22
	Над поверхностью уступа	0,07	0,05

Концентрация метана в определяемой точке (мг/м³) для точечного и линейного источников соответственно определяется по формулам [7]:

$$c = C_{CH_4} \exp \frac{-6,3 \sqrt{(y^2 + z^2)^{1,3}}}{\varphi x^{1,3}} \quad (7)$$

$$c = C_{CH_4} \exp \frac{-3,9 y^2}{\varphi x^2} \quad (8)$$

Следует отметить, что присутствие на глубоких разрезах метана должно восприниматься как вредный и опасный фактор. Вместе с тем, учитывая, что увеличение метаносности характерно для глубоких разрезов, важно обратить внимание на то, что на рабочих местах уменьшается энергия ветра и на дне карьера дольше задерживаются все вредные газы, включая метан.

Для разбавления метана в зонах проведения буровзрывных работ, добычи и транспортировки угля возможно применение мероприятий по снижению концентрации метана на рабочем месте и применение искусственной вентиляции разреза [8]. Среди них на стадии проектирования возможно изменение угла откоса и профиля борта разреза. А на стадии производства работ – применение навесных рыхлителей для отказа от проведения буровзрывных работ [8] и снижение объемов извлечения горных пород для снижения интенсивности газовой выделения.

Выбор схемы и методов искусственного проветривания разрезов должен удовлетворять потребности в объеме возду-

ха (Q_e , м³/с), необходимого для разбавления газов до значений предельно допустимой концентрации метана (7 000 мг/м³ [9]).

Q_e определяется исходя из интенсивности метановыделения с источников метана (Q , мг/с) [10]:

$$Q_e = \frac{Q}{k(C_d - C)} \quad (9)$$

где k – коэффициент эффективности естественного проветривания (табл. 1);

C_d и C – предельно допустимая концентрация метана на рабочем месте и его концентрация в разрезе соответственно, мг/м³.

Согласно [7], выбор способа вентиляции происходит в первую очередь исходя из проектной формы. Далее определяются заданные величины площади разреза и объема извлекаемой горной массы, а также интенсивность углубления горных работ.

Исходя из эксплуатационных характеристик разреза (длина, ширина, глубина, наличие местных сопротивлений и др.) и необходимого количества воздуха определяются установки искусственного проветривания. Ранее были разработано оборудование для вентиляции разрезов.

В таблице 3 представлены основные характеристики вентиляционных установок.

Вентиляционные установки подразделяются исходя из диаметра и дальности струи, расхода воздуха и мощности. Чем крупнее опасная зона, тем длиннее должна быть струя воздушного потока, создаваемого вентиляционной установкой. При этом необходимо обращать внимание на мощность установки для экономии электроэнергии. Для разбавления газовой выделения из скважин подойдут установки с минимальным диаметром струи.

Однако в случае обширных полей зон обнажения угля и вмещающих пород или же разветвленной транспортной сети по доставке угля за пределы разреза потребуются установки с большим диаметром струи или их количество будет необходимо увеличить. Оптимальная установка соответствует технологическим параметрам добычных работ (интенсивность газовой выделения, размеры разреза и зон обнажения угля и пород) и потребляет минимум электроэнергии.

Рассмотрим источники газовой выделения (Q , мг/с) для определения интенсивности газовой выделения. Представим ее в первом приближении в результате ведения буровзрывных работ [11–13] и работ по извлечению [14, 15] и транспортировке угля [16, 17].

В соответствии с исследованиями, газовой выделения из источников метана определяется по формулам:

$$Q_{скв} = 0,7 \left(\frac{\pi A (P_{пл}^2 - P_0^2)}{P_0 \mu \left(\ln r_{скв} + \frac{1}{k} \right)^2} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1 + aP_{пл})^2} \right), \text{ мг/с} \quad (10)$$

где $Q_{скв}$ – эмиссия метана от скважины буровзрывных работ, кг/с;

$r_{скв}$ и A – радиус и глубина скважин, м;

P_0 – атмосферное давление газа, Па;

$P_{пл}$ – давление газа в забое скважины на её максимальной глубине, Па;

C – размерный коэффициент;

a, b – параметры изотермы сорбции Лэнгмюра;

k – коэффициент проницаемости породы, м².

Характеристика вентиляционных установок [8] / Characteristics of ventilation units [8]

Наименование	Мощность, кВт	Тип струи	Диаметр струи, м	Дальность струи, м	Расход воздуха (начальный – конечный), м³/с
ПВУ-6	2 000	Изотермическая	1,8	700	200–33 500
УМП-1	364	Изотермическая	3,6	350	220–7 500
АИ-20КВ	2 940	Неизотермическая	4,5	800	640–45 000
НК-12КВ	11 000	Изотермическая	5,6	1 300	1 300–89 000
УВУ-1	30 000	Неизотермическая	1,15	1 300	190–93 000
УМП-14	320	Изотермическая	14,4	570	1 160–27 700
УМП-21	1 200	Изотермическая	21	1 000	3 770–78 500
УКПК-1	36 500	Конвективная	10	300	0–48 000

$$Q_{изв} = 0,7mL \left(\frac{k}{\mu} \frac{\partial p(n,t)}{\partial n} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1+ap(n,t))^2} \right), \text{ мг/с} \quad (11)$$

где $Q_{изв}$ – эмиссия метана от обнаженного пласта, кг/с;
 $p(b, t)$ – давление газа на максимальном углублении при извлечении угля b , Па;

μ – динамическая вязкость газа, Па · с;

m, n, L – длина, ширина и глубина обнажения породы, м;

t – длительность добычи угля, с.

$$Q_{отб} = 0,7 \left(1 - \frac{v}{100} \right) \nu m n \frac{3}{r} \left(\frac{4\pi r^2 \int_0^t \frac{k}{\mu} \frac{\partial p(r,t)}{\partial r} dt}{\frac{4\pi r^3}{3}} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1+ap_r)} \right), \text{ мг/с} \quad (12)$$

где $Q_{отб}$ – эмиссия метана от отбитого угля, кг/с;

v – зольность угля, %;

r – радиус кусков угля, м;

ρ – насыпная плотность угля, принимается равной 0,85 т/м³;

$p(r, t)$ – давление газа в частице угля в момент времени t , Па.

Обозначим, что выделение метана возможно при несложном процессе бурения в случае, если $P_{пл}$ [11]:

$$P_0 < P_{пл} \quad (13)$$

где P_0 – давление в начале бурения скважины, равное атмосферному, Па;

$P_{пл}$ – пластовое давление, Па.

При этом прием условие, что

$$P(\infty, t) = P_{пл} \quad (14)$$

$$P(A, 0) = P_0. \quad (15)$$

В случае метановыделения при обнажении угольного пласта граничные и начальные условия примут следующий вид

$$P(x, 0) = P_{пл} \quad (16)$$

$$P(\infty, t) = P_{пл} \quad (17)$$

$$\frac{\partial P(\infty, t)}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$p(0, t) = p_0. \quad (19)$$

Примем условие, что в начальный момент времени уголь насыщен метаном под давлением $P_{нач}$. Обозначим, что давление метана в кусках угля, расположенных на транспортной линии (конвейер или автотранспорт), одинаково.

В этом случае начальное условие

$$P_{нач}(r, 0) = P, \quad (20)$$

где $P_{нач}$ – начальное давление в частице угля радиусом r (м), Па.

В качестве допущения примем следующие граничные условия:

$$P(r, t) = P_0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial p(0, t)}{\partial r} = 0. \quad (22)$$

Результаты исследований

Примем условие, что транспортировка угля является линейным источником выделения метана, бурение скважин – точечным источником газовой выделения, обнажение угля – площадным источником газовой выделения. Схема проветривания разреза – прямоточная.

Для всех источников посчитаем содержание метана на удаление до 1 000 м от границы разреза (рис. 2 и 3).

Обозначим ее как санитарно-защитную. Весь разрез разделен на зоны буровзрывных и добычных работ, а также зоны транспортировки угля.

Ширина разреза L_B – 300 м, а длина L_A – 4 000 м.

u_v возьмем равной 186 м/мин. L при направлении движения воздуха A примем равным 4 000 м, при направлении B – 300 м. Определим концентрацию метана на расстоянии 2 м и 1 000 м от границы разреза. Соответственно, для направления A x будет равным 2 000 и 3 000 м, а y – 150 м и 1 150 м. Для направления B , наоборот, z во всех случаях примем равным 2 м (замер на уровне органов дыхания). Это указывает на высоту над уровнем земли, на которой производится измерение концентрации метана. В данном случае концентрация метана измеряется на высоте 2 м от поверхности земли. m и n – длина и ширина зоны добычи угля. Зона обнажения пород характеризуется количеством

буровзрывных скважин и их диаметром $2r$, а также глубиной скважин до 22 м. УМП-14 – предполагаемое место для размещения оборудования по искусственной интенсификации воздушного потока на разрезе.

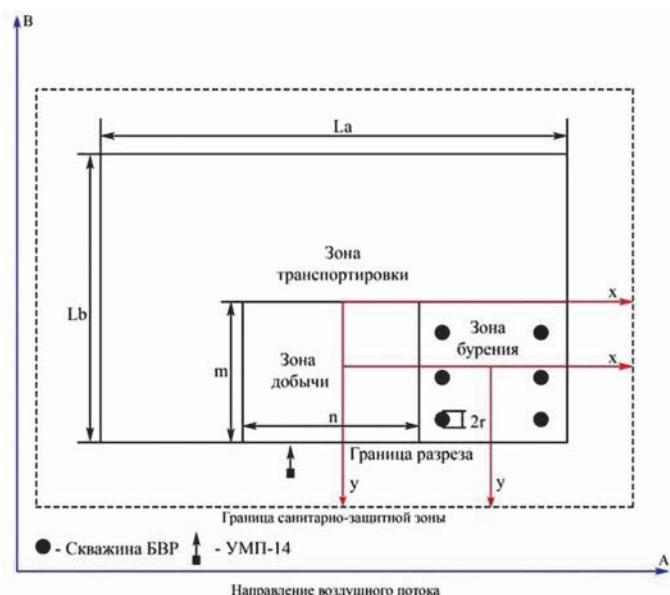


Рис. 2. Схема добычи угля на разрезе (вид сверху) /
Fig. 2. Scheme of coal mining at the open pit (top view)

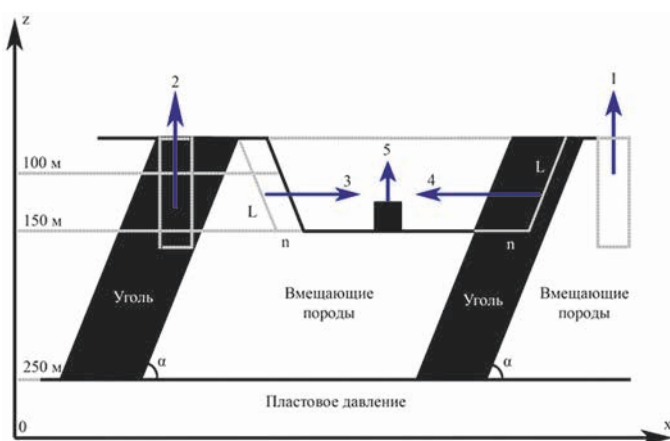


Рис. 3. Схема добычи угля на разрезе (вид сбоку) /
Fig. 3. Scheme of coal mining at the open pit (side view)

Работы выполняются в течение 12 ч. Горные породы имеют плотность 2,5–3,5 м³/т, являются супесями и гранитом. Угольные пласты преимущественно залегают на глубине 250 м под углом 56–90° с суммарной мощностью более 40 м (коксовые угли). Их остаточная и природная газонасыщенность – 2 м³/т и 5 м³/т, зона газового выветривания – менее 100 м.

Оценим газовыделение по формулам (10)–(12) при условиях, представленных в таблицах 4–6.

Таблица 4 / Table 4

Исходные данные для моделирования газовыделения из скважин буровзрывных работ /
Input data for modeling gas emission from drilling and blasting wells

$k, \text{м}^2$	$P_{\text{ср}}, \text{кПа}$	$P_{\text{пл}}, \text{кПа}$	$A, \text{м}$	$\mu, \text{Па} \cdot \text{с}$	$r_{\text{св}}, \text{м}$	$a, \text{Па}^{-1}$	$b, \text{т/м}^3$
$3,6 \cdot 10^{-12} - 3,6 \cdot 10^{-13}$	101,325	200	16–22	12	0,07–0,138	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Таблица 5 / Table 5

Исходные данные для моделирования газовыделения при обнажении угля /

Input data for modeling of gas emission during coal exposure

$k, \text{м}^2$	$L, \text{м}$	$n, \text{м}$	$m, \text{м}$	$\mu, \text{Па} \cdot \text{с}$	$p(x, t), \text{Па}$	$a, \text{Па}^{-1}$	$b, \text{т/м}^3$
$3,6 \cdot 10^{-12} - 3,6 \cdot 10^{-13}$	300–4 000	100–1 000	5–30	12	100 000–200 000	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Таблица 6 / Table 6

Исходные данные для моделирования газовыделения от частиц отбитого угля и вмещающих пород /

Input data for modeling of gas emission from particles of broken coal and host rocks

$z, \%$	$v, \text{м/мин}$	$h, \text{м}$	$m, \text{м}$	$r, \text{м}$	$a, \text{Па}^{-1}$	$b, \text{т/м}^3$
10–50	200–300	20–40	5–30	0,1–0,91	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Для вариативных величин для расчета примем среднее значение.

Тогда $Q_{\text{БВР}} = 134\,000 \text{ мг/с}$, $Q_{\text{ОБН}} = 616\,000 \text{ мг/с}$, $Q_{\text{ТР}} = 166\,680 \text{ мг/с}$.

Исходные данные для определения концентрации метана представим в таблице 7, актуальные для усредненного разреза [2], работающего в метановой зоне. Условия для моделирования сведем в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

Условия моделирования эмиссии метана

от открытых горных работ /

Modeling conditions of methane emission from surface mining operations

Источник метана	$Q, \text{мг/с}$	$L, \text{м}$		k	k'	b'	$u_p, \text{м/с}$	$u_{\text{ср}}, \text{м/с}$
		A	B					
$Q_{\text{св}}$	134 011	-		3	0,05	0,05	1	3,1
$Q_{\text{изв}}$	616 043	4 000	300	5,7	0,045	0,22		
$Q_{\text{отб}}$	166 678	4 000	300	2,7	0,045	0,22		

Также определим содержание метана в границах разреза [3] и санитарной зоны 1 000 м. Кроме того, определим содержание метана в случае направления воздушного потока B .

В этом случае L примем равной 300 м [4].

Значения x , y и z представлены в таблице 8.

Подставляя значения Q , k , k' , b' , u_p , $u_{\text{ср}}$ и L в формулы (1)–(9), получим:

Для направления A (результаты представлены в табл. 9):

– для буровзрывных работ:

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{500034}{0,042025x^2} \quad c = C_{\text{CH}_4} \exp \frac{-6,3\sqrt{(y^2+z^2)^{1,3}}}{0,205 \cdot x^{1,3}};$$

– для работ по извлечению угля:

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{763862,7}{1438x} \quad c = C_{\text{CH}_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2};$$

– для работ по транспортировке угля:

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{1663316,1}{1438x} \quad c = C_{\text{CH}_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2}.$$

Для направления В:

– для буровзрывных работ:

$$C_{CH_4} = \frac{500034}{0,042025x^2} \quad c = C_{CH_4} \exp \frac{-6,3\sqrt{(y^2+z^2)^{1,3}}}{0,205 \cdot x^{1,3}};$$

– для работ по извлечению угля:

$$C_{CH_4} = \frac{763862,7}{7,19x} \quad c = C_{CH_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2};$$

– для работ по транспортировке угля:

$$C_{CH_4} = \frac{1663316,1}{2,157x} \quad c = C_{CH_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2}.$$

Также посчитаем среднее геометрическое газовыделение $Q_{геом}$ [18, 19].

Исходя из рисунка 2 определим, что зона буровзрывных работ и зона добычи угля занимают по 17 % пространства разреза, остальное приходится на зону транспортировки угля.

Результаты представлены в таблице 9.

Было определено, что средняя интенсивность метановыделения не приводит к превышению предельно допустимой концентрации метана. В связи с этим посчитаем концентрацию метана в атмосфере и определяемой точке по формулам (1)–(9) в границах рабочего места. Рабочим местом примем площадь 4 м² вокруг источника метана. Сохраним условия моделирования (табл. 8 и 9). Изменяются только координаты x , y и z .

Условия моделирования приведены в таблице 10, а результаты – в таблице 11.

На основе анализа результатов выявлено, что в процессе буровзрывных работ и работ по транспортировке концентрация метана в воздухе рабочей зоны сохраняется в пределах 7 000 мг/м³ (с учетом погрешности +/- 500 мг/м³). Однако при обнажении угля концентрация в определяемой точке в границах 2 м на рабочем месте может достигать 10 325 мг/м³. Для ее снижения потребуются интенсификация воздушного потока с помощью искусственной вентиляции или снижение добычи угля.

Рассмотрим возможные мероприятия по искусственной интенсификации вентиляции разреза. Источник метана – то-

Таблица 8 / Table 8

Значения координат x , y и z / Coordinate values x , y and z

Направление воздушного потока	Расстояние от разреза, м	Координаты, м								
		$Q_{скв}$			$Q_{обн}$			$Q_{отб}$		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
А	0	2 000	150	2	2 000	150	2	2 000	150	2
	1 000	3 000	1 150		3 000	1 150		3 000	1 150	
В	0	150	2 000		150	2 000		150	2 000	
	1 000	1 150	3 000		1 150	3 000		1 150	3 000	

Таблица 9 / Table 9

Концентрация метана на оси OV и концентрация метана в определяемой точке в границах разреза и защитной зоны /
Atmospheric methane concentration and methane concentration at the determined point within the boundaries
of the transect and protection zone

Направление воздушного потока	Расстояние, м	$Q_{скв}$		$Q_{обн}$		$Q_{отб}$		$Q_{грам}$	
		C_{CH_4}	C	C_{CH_4}	C	C_{CH_4}	C	C_{CH_4}	C
А	0	0,265	0,25	7,525	7,07	3	2,985	3,046	2,962
	1 000	0,177	0,036	0,385	0,08	1,32	0,0001	0,9	0,019
В	0	700	256,5	1 521	560	2 900	401,57	2 095,36	371,582
	1 000	0,462	0,04	1,006	0,1	11,9	2,87	7,375	1,744

Таблица 10 / Table 10

Условия моделирования концентрации метана на рабочем месте в процессе ведения открытых горных работ /
Modeling conditions of methane concentration at the workplace, during surface mining operations

Источник метана	Q , мг/с	Координаты			L , м		k	k'	b'	u_p , м/с	u_v , м/с
		x , м	y , м	z , м	А	В					
$Q_{скв}$	134 011	2			-		3	0,05	0,05	1	3,1
$Q_{изв}$	616 043				4 000	300	5,7	0,045	0,22		
$Q_{отб}$	166 678				4 000	300	2,7	0,045	0,22		

Таблица 11 / Table 11

Концентрация метана на оси OV и концентрация метана в определяемой точке на рабочем месте /
OV methane concentration and methane concentration at the point to be determined at the workplace

Направление воздушного потока	$Q_{скв}$		$Q_{обн}$		$Q_{отб}$	
	C_{CH_4} , мг/м ³	C , мг/м ³	C_{CH_4} , мг/м ³	C , мг/м ³	C_{CH_4} , мг/м ³	C , мг/м ³
А	2 975	675	26 560	5 162	11 240	1 032
В	29 740	6760	53 120	10 325	38 556	7 494

чечный, расположен на поверхности уступа, схема проветривания – прямоточная.

В соответствии с таблицей 1 примем среднее значение $k = 5,7$. Посчитаем необходимое количество воздуха для разбавления метана каждый час работы разреза, используя формулу (10)

$$Q_a = \frac{Q_{изв}}{k(C_d - C(Q_{изв}))} = \frac{616043}{5,7(10325 - 7000)} = 32,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Анализируя таблицу 3, можно сделать вывод, что почти все рабочие установки отвечают ключевым критериям установок искусственной вентиляции карьера ($Q_a = 32,5 \text{ м}^3/\text{с}$, диаметр струи – более 2 м для охвата всего рабочего места, а дальность – более 300 м в соответствии с шириной разреза). Тогда выбор следует сделать исходя из мощности установки. В этом случае идеально подойдет УМП-14, установленная в направлении воздушного потока B (рис. 2).

Обсуждение результатов

Прежде чем приступать к анализу полученных результатов, следует обратить внимание, что эмиссия от угля, добываемого открытым способом, превышает эмиссию от угля, добытого подземным способом за счет большего количества вновь введенных разрезов, чем шахт [1]. Анализируя модель усредненного разреза, ведущего работу в метановой зоне, мы учитывали, что газоносность углей на глубинах 150–250 м менее $5 \text{ м}^3/\text{т}$.

Таким образом, было предположено, что интенсивность газовыделения на разрезе не способна существенно повлиять на состояние окружающей среды на расстоянии от границы разреза. И действительно, при условии, что интенсивность газовыделения находится в промежутке между 100 000–650 000 $\text{мг}/\text{с}$, мы убедились, что ни на границе разреза, ни тем более на расстоянии 1 000 м от него содержание метана в атмосфере не приближается к предельно допустимым.

Так, на оси OV содержание метана не достигает и $3\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. А концентрация метана в произвольной точке не достигнет и $600 \text{ мг}/\text{м}^3$. Ни при направлении воздушного потока A , ни при направлении воздушного потока B . Примечательно, что длина и другие геометрические параметры разреза существенно влияют на наполнение метана в атмосфере. Например, содержание метана, выделившегося в процессе бурения скважины, в произвольной точке будет почти в 3 000 раз больше при направлении B , чем при направлении A .

Тем не менее выявлено, что на рабочем месте возможно накопление метана выше предельно допустимых значений при направлении воздушного потока B . При направлении

воздушного потока A – в пределах нормы. И только при добыче угля достигает $5\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. В остальных случаях концентрация метана – менее $1\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Поэтому рассмотрим результаты, полученные при вычислении концентрации метана в случае направления воздушного потока B . При добыче угля концентрация метана в произвольной точке – более $10\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. В остальных случаях она также составляет примерно $7\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. И для разбавления метана до допустимых значений потребуется более $30 \text{ м}^3/\text{с}$ расхода дополнительного воздуха.

Обратим внимание, что данные выводы были сделаны при нормальной скорости воздушного потока – $3,1 \text{ м}/\text{с}$. В случае возникновения инверсии (скорость ветра – менее $0,8 \text{ м}/\text{с}$) [20] концентрация метана может быть еще больше. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований в данном направлении.

Заключение

Содержание метана на границе санитарно-защитной зоны в зависимости от направления воздушного потока и источника колеблется в пределах $0,0001\text{--}2,87 \text{ мг}/\text{м}^3$. Общее содержание метана не превышает $3 \text{ мг}/\text{м}^3$.

На границе разреза содержание метана в зависимости от направления воздушного потока и источника колеблется в пределах $0,25\text{--}560 \text{ мг}/\text{м}^3$. Общее содержание – не более $1\,220 \text{ мг}/\text{м}^3$. Сделан вывод, что на границе разреза и санитарно-защитной зоны превышение предельно допустимой концентрации маловероятно.

На рабочем месте содержание метана в случае направления A колеблется в пределах $675\text{--}5\,162 \text{ мг}/\text{м}^3$, что также исключает возможность превышения концентрации метана. Однако при направлении воздушного потока B концентрация метана на рабочем месте колеблется в пределах $6\,760\text{--}10\,325 \text{ мг}/\text{м}^3$. Сделан вывод, что при обнажении пласта возможно превышение концентрации метана и требуется разработка мероприятий по ее снижению.

Обоснована необходимость искусственной вентиляции на рабочем месте. Присутствие метана в рабочей зоне карьера обуславливает необходимость разработки мероприятий по снижению эмиссии метана. Предложены мероприятия по искусственному проветриванию усредненного разреза. Для разбавления метана до допустимых значений необходим расход воздуха $32,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таким образом, на основе представленных данных можно сделать вывод о необходимости принятия мер по контролю и снижению содержания метана в атмосфере разреза для обеспечения допустимых условий работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Тайлаков ОВ, Застрелов ДН, Макеев МП и др. К оценке эмиссии метана при добыче угля открытым способом. *Вестник научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2023; 2: 35–40. [Tajlakov OV, Zastrelov DN, Makeev MP, et al. Towards the assessment of methane emissions during open-pit coal mining. *Bulletin of the Scientific Center VOSTNII for Industrial and Environmental Safety*. 2023; 2: 35–40. (In Russ.)] DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.81.96.004.
2. Архипов ИА. Разработка модели среднестатистического разреза, работающего в метановой зоне. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024; 4 (10): 3–25. [Arhipov IA. Development of a model of an average section operating in the methane zone. *MIAB*. 2024; 4 (10): 3–25. (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_10_3.
3. Amnache A, Omri M, Fréchette L. A silicon rectangular micro-orifice for gas flow measurement at moderate Reynolds numbers: design, fabrication and flow analyses. *Microfluidics and Nanofluidics*, Springer Verlag. 2018; 22 (6). DOI: 10.1007/s10404-018-2077-x.
4. Кондратьев СА, Хамзина ТА. Повышение качества концентрации во флотационном обогащении низкосортного угля. *Записки Горного института*. 2024; 265: 65–77. [Kondrat'ev SA, Hamzina TA. Improvement of concentration quality in flotation beneficiation of low-grade coal. *Notes of the Mining Institute*. 2024; 265: 65–77. (In Russ.)].

5. Бахарев ВА. К теории и расчету свободных турбулентных струй. *Теория и расчет вентиляционных струй*. Ленинград, 1965: 12-26. [Baharev VA. To the theory and calculation of free turbulent jets. *Theory and calculation of ventilation jets*. Leningrad, 1965: 12-26. (In Russ.)].
6. Poncelet J, Fonseca-Colomb A, Grilli G. Enlarging ESA? After the Accession of Luxembourg and Greece. *ESA Bulletin: journal*. 2004; 120: 48-53.
7. Li Ks, CHzhan YUe, Czyan V, et al. Preliminary application of Sentinel-5P. Satellite Tropomi sensor in atmospheric pollution monitoring in Jiangsu Province [J] environmental monitoring and warning. 2019; 11 (02): 10-16.
8. Прохоров АВ, Носков ИВ. Мониторинг магистральных нефте-газопроводов при помощи беспилотных летательных аппаратов. *Вестник евразийской науки*. 2022. 6 (14): 1-10. [Prokhorov AV, Noskov IV. Monitoring of main oil and gas pipelines using UAVs. *Eurasian Scientific Journal*. 2022. 6 (14): 1-10. (In Russ.)].
9. Weidmann D, Hoffmann A, Macleod N, et al. The Methane Isotopogues by Solar Occultation (MISO) Nanosatellite Mission: Spectral Channel Optimization and Early performance Analysis. *Remote Sens*. 2017; 9 (1073): 1-20.
10. Nisbet GN, Dlugokencky EJ, Bousquet PE. Methane on the rise – Again. *Science*. 2014; 343: 493-495.
11. Рогалев МС, Саранчин НВ, Маслов ВН и др. Определение расхода газового потока при проведении гидродинамических исследований скважин: ч. 3. *Нефть и газ*. 2017; 1: 72-82. [Rogalev MS, Saranchin NV, Maslov VN, et al. Determination of gas flow rate during hydrodynamic studies of wells: Part 3. *Oil and gas*. 2017; 1: 72-82. (In Russ.)].
12. Wang G, Liu Z, Hu Y, et al. Influence of gas migration on permeability of soft coalbed methane reservoirs under true triaxial stress conditions. *R. Soc. Open. Sci*. 2019; 6 (10):190892. DOI: 10.1098/rsos.190892.
13. Григорьевский ВИ, Тезадов ЯА. Моделирование измерений концентрации метана лидаром в замутненном пространстве. *Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийская открытая научная конференция*. Муром, 2021: 186-193. [Grigor'evskij VI, Tezadov YaA. Modeling of lidar measurements of methane concentration in turbid space. *All-Russian Open Scientific Conference "Modern Problems of Remote Sensing, Radiolocation, Wave Propagation and Diffraction"*. Murom, 2021: 186-193. (In Russ.)].
14. Коликов КС, Драгунский ОН. Решение задач аэрологии и экологии карьеров в условиях взаимовлияния атмосферы выработанных пространств и окружающих их территорий. *Безопасность труда в промышленности*. 2023; 1: 35-41. [Kolikov KS, Dragunskij ON. Solving problems of aerology and ecology of quarries in conditions of mutual influence of the atmosphere of mined-out spaces and the surrounding territories. *Industrial safety*. 2023; 1: 35-41. (In Russ.)].
15. Шевченко ЛА, Ткаченко ДА, Астраков СН. Математическое моделирование газодинамического состояния угольного массива в зоне влияния скважины в процессе бурения. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2016; 1: 67-69. [Shevchenko LA, Tkachenko DA, Astrakov SN. Mathematical modeling of the gas-dynamic state of the coal massif in the zone of influence of the well during the drilling process. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 1: 67-69. (In Russ.)].
16. Азатьян ВВ, Тимербулатов ТР, Шатиоров СВ. Эффективные химические методы управления горением, взрывом и детонацией газов. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2012; 2: 27-37. [Azatian V.V., Timerbulatov T.R., Shatirov S.V. Efficient chemical methods to control burning, explosion and gas detonation *Bulletin of the scientific center for safety of work in the coal industry*. 2012; 2: 27-37. (In Russ.)].
17. Захаров ВН, Малинникова ОН, Трофимов ВА и др. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016; 2: 16-26. [Zaharov VN, Malinnikova ON, Trofimov VA, et al. Dependence of coal seam permeability on gas content and effective stresses *Physico-technical problems of mineral development*. 2016; 2: 16-26. (In Russ.)].
18. Григорьевский ВИ, Садовников ВП, Элкабидзе АВ. Лазерный контроль фоновой концентрации метана в районе северо-востока Московской области. *Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийская открытая научная конференция*. Муром, 2022: 230-236. [Grigorievsky BI, Sadovnikov VP, Elkabidze AV. Laser control of background methane concentration in the area of the north-east of the Moscow region. *All-Russian Open Scientific Conference «Modern Problems of Remote Sensing, Radiolocation, Wave Propagation and Diffraction»*. Murom, 2022: 230-236. (In Russ.)]. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-230-236.
19. Grigorievsky VI, Tezadov YA. Modeling and Experimental Study of Lidar Resolution to Determine Methane Concentration in the Earth's Atmosphere. *Cosmic Research*. 2020; 58 (5): 330-337.
20. Киряева Т. Изменение температуры при разработке углеметанового пласта – как мера его выбросоопасности. *German International Journal of Modern Science*. 2021; 6: 11-14. [Kiryaeva T. Temperature change during the development of a coal methane seam – as a measure of its outburst hazard. *German International Journal of Modern Science*. 2021; 6: 11-14. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Игорь Александрович Архипов –

аспирант по направлению «Науки о Земле». Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: cond-95@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Igor A. Arhipov –

Graduate Student in the Field of Earth Science, National university of science and technology "MISIS", 119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: cond-95@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.05.2025.

Поступила после рецензирования: 06.07.2025.

Принята к публикации: 25.07.2025.

Article info

Received: 12.05.2025.

Revised: 06.07.2025.

Accepted: 25.07.2025.

После продолжительной болезни 7 августа 2025 года на 72-м году ушел из жизни известный ученый-маркшейдер, профессор, доктор технических наук, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации Гордеев Виктор Александрович – человек незаурядных способностей, прекрасный руководитель, специалист по вопросам геометризации условий разработки месторождений полезных ископаемых, оценки устойчивости карьерных откосов и др. Горная общественность скорбит в связи с кончиной коллеги и друга.

СКОРБИМ В СВЯЗИ С КОНЧИНОЙ НАШЕГО КОЛЛЕГИ ГОРДЕЕВА ВИКТОРА АЛЕКСАНДРОВИЧА

Виктор Александрович родился 16 марта 1954 года в г. Свердловске. Окончил с отличием по специальности «маркшейдерское дело» сначала в 1973 году Свердловский горно-металлургический техникум имени И. И. Ползунова (ныне Уральский государственный колледж) и в 1978 году Ленинградский горный институт имени Г. В. Плеханова. Поступил в очную аспирантуру при кафедре маркшейдерского дела Свердловского горного института (ныне Уральский государственный горный университет).

В 1981 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Горно-геометрическое районирование карьерных полей по факторам устойчивости откосов» и до 1988 года работал в должности старшего научного сотрудника кафедры маркшейдерского дела. Лауреат премии Свердловского обкома ВЛКСМ в области науки и техники (1986). В 1986 году ему было присвоено ученое звание старшего научного сотрудника. С сентября 1987-го по июль 1988 года проходил научную стажировку при Институте геодезии и маркшейдерского дела Фрайбергской горной академии (ГДР).

С 1988 по 1994 год работал доцентом кафедры маркшейдерского дела, с 1994 до 2019 года – заведующим этой кафедрой. В 1994 году защитил докторскую диссертацию на тему «Основы геометризации геотехнических условий разработки на карьерах». Получил ученую степень доктора технических наук (1995) и ученое звание профессора (1997). Читал курсы лекций «Теория ошибок и уравнивательные вычисления», «Анализ точности маркшейдерских работ».

С августа 2000-го по январь 2003 года был первым проректором Уральской государственной горно-геологической академии, с сентября 2003-го по декабрь 2014 года – деканом горно-технологического факультета, сохраняя при этом должность заведующего кафедрой маркшейдерского дела и профессора. С 2020 года был профессором кафедры кадастра и геоинженерии Кубанского государственного технологического университета (г. Краснодар) по курсу «Геодезия». В период 2001–2019 годов он возглавлял диссертационный совет Д 212.280.02 при УГГУ, а с 2019 по 2022 год был членом этого диссовета.

Вклад Виктора Александровича в горную науку и маркшейдерское дело отмечен государственными наградами и признанием горной общественности. Он стал заслуженным работником высшей школы Российской Федерации (2005), действительным членом Академии горных наук (1998); членом Центрального совета (1998) и НТС Союза маркшейдеров России (СМР); членом Немецкого маркшейдерского союза (DMV); членом президиума (2004) и членом IV комиссии Международного общества маркшейдеров (ISM); членом Международного общества по геомеханике и геоинженерии (2018), иностранным членом Союза маркшейдеров Казахстана (2012), членом редколлегии журналов «Маркшейдерский вестник» (1995), «Известия УГГУ», «Известия вузов. Горный журнал» и «Маркшейдерия и недропользование».

Виктор Александрович был невероятно отзывчивым человеком, прекрасным другом. Память о нем навсегда сохранится в сердцах тысяч людей. Это невосполнимая утрата для друзей, близких и всего маркшейдерского сообщества.

ООО «Союз маркшейдеров России», МОО «Союз ветеранов Ростехнадзора», коллектив журнала «Маркшейдерия и недропользование» выражают глубокие соболезнования родным и близким.





2025
РОССИЯ

21-Й ГОРНЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА МАЙНЕКС РОССИЯ МАРАФОН ВОЗМОЖНОСТЕЙ

8 - 9 октября 2025 года,
Москва, Рэдиссон Славянская

УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ



0+

minexrussia.ru

NEDRA 4.0

ИННОВАЦИИ, БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ

16–17 февраля 2026 | Санкт-Петербург

КОНГРЕСС ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

130+

КОМПАНИЙ

300+

УЧАСТНИКОВ

35+

ДОКЛАДЧИКОВ

40+

СТЕНДОВ

100+

VIP-ВСТРЕЧ

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ ПРОГРАММЫ:

- Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли
- Отечественные IT-решения и оборудование для добычи и переработки
- Цифровизация процессов добычи и обогащения
- Промышленная безопасность и защита данных
- Современные подходы для анализа данных в промышленности

0+



+ 7 495 198 63 40
nedra4@sbproect.ru

ПРИМИТЕ УЧАСТИЕ В ГЛАВНОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ СОБЫТИИ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ!



Масштабное событие горной отрасли в России

Рудник

официальная поддержка:



Минпромторг
России



Торгово-промышленная
палата Российской Федерации



Правительство
Свердловской области



НП «Горнопромышленники
России»

22–24 октября 2025
Екатеринбург

**10-я международная выставка современных
технологий, оборудования и спецтехники
для горнодобывающей промышленности**

принять участие



посетить



МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»
ЭКСПО-бульвар, дом 2
(342) 206-44-80

mine.proexpo.ru



**pro
ЭХПО**

0+

